รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การผลิตปุ๋ยสตรูไวท์จากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากโรงงานเกษตรอุตสาหกรรมและฟาร์มสุกร

ดร.รอบรู้ รังสิเวค

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้

จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๖๐

มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ ……..

สัญญาเลขที่ 110/2560

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การผลิตปุ๋ยสตรูไวท์จากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากโรงงานเกษตรอุตสาหกรรมและฟาร์มสุกร

ดร.รอบรู้ รังสิเวค

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยบูรพา

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๖๐

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๖๐ มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 110/ 2560

This work was financially supported by the Research Grant of Burapha University through National Research Council of Thailand (Grant no. 110/2560)

ขอขอบคุณนักศึกษาช่วยงานทุกท่าน

บทสรุปสำหรับผู้บริหาร

(Executive Summary)

ข้าพเจ้า ดร. รอบรู้ รังสิเวค ได้รับทุนสนับสนุนโครงการวิจัยจากมหาวิทาลัยบูรพา ประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผนดิน) มหาวิทยาลัยบูรพา โครงการวิจัยเรื่อง การผลิตปุ๋ยสตรูไวท์จากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากโรงงานเกษตรอุตสาหกรรมและฟาร์มสุกร หรือ Production of Struvite Fertilizer from treated wastewater of agricultural industries and pig farms รหัสโครงการ สัญญาเลขที่ ๑๑๐/๒๕๖๐ ได้รับงบประมาณรวมทั้งสิ้น ๖๐๘,๒๐๐ บาท (หกแสนแปดพันสองร้อยบาทถ้วน) โดยมีระยะเวลาการดำเนินงาน ๑ ปี ตั้งแต่วันที่ ๑ ตุลาคม พ.ศ. ๒๕๕๙ ถึงวันที่ ๓๐ กันยายน พ.ศ. ๒๕๖๐ บัดนี้ได้ทำงานวิจัยแล้วเสร็จ มีบทสรุปสำหรับผู้บริหารดังนี้ น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนโดยการผลิตก๊าซชีวภาพยังมีธาตุอาหารอยู่สูง ด้วยการบังคับของกฎหมายผู้ประกอบการจึงไม่สามารถปล่อยน้ำเสียเหล่านี้ลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้เพราะจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชั่น (Eutrophication) ทำได้เพียงปล่อยให้น้ำไหลซึมสู่ดิน เกษตรกรบางส่วนนำไปใช้เพาะปลูก ซึ่งไม่เห็นประโยชน์อย่างเป็นรูปธรรม ปุ๋ยสตรูไวท์(Struvite) หรือแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต (Magnesium Ammonium Phosphat:MAP) มีสูตรทางเคมีคือ $MgNH_4PO_4$ เป็นแนวทางการดึงสารอาหารในน้ำเสียนำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างเป็นรูปธรรม โดยการตกตะกอนของแมกนีเซียมไอออน(Mg^{2+}), แอมโมเนียมไอออน(NH_4^+) และฟอสเฟตไอออน(PO_4^{3-}) ในสภาวะที่เหมาะสม มีลักษณะเป็นผลึกสีขาวแกมเหลืองอ่อน หรือน้ำตาลอ่อน ด้วยความสามารถในการละลายที่น้อย (ค่า $K_{sp} \approx 7.08 \times 10^{-4}$) (กรมควบคุมมลพิษ, 2554) มีคุณสมบัติเป็นปุ๋ยละลายช้า พืชสามารถใช้ประโยชน์ได้อย่างยาวนาน

โดยในงานวิจัยนี้น้ำเสียที่นำมาพิจารณาในการตกผลึก MAP ได้แก่ น้ำที่ออกจากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ (Biogas outlet) น้ำบ่อสุดท้าย (post treatment) และกากตะกอนน้ำเสีย (Sludge) จากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม และฟาร์มสุกร พบว่าน้ำเสียจากกากตะกอนฟาร์มสุกรมีสารอาหารตั้งต้น (Mg^{2+}, NH_4^+ และ PO_4^{3-}) มากที่สุด คือ 279, 450 และ 700 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ส่วนน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง และสกัดน้ำมันปาล์มมี Mg^{2+} ที่สูง (1750 มิลลิกรัมต่อลิตร) แต่มี NH_4^+ และ PO_4^{3-} คือ 70 และ 42 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ อีกทั้งมีค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) ที่สูง คือ 3,500-5,700 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งอาจจะมีผลรบกวนต่อการตกตะกอนปุ๋ยสตรูไวท์ อย่างไรก็ตามได้เลือกที่จะใช้น้ำเสียจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจาก การทดสอบในห้องปฏิบัติการ MAP จึงพิจารณาน้ำที่ออกจากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพของโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังซึ่งมีธาตุอาหารหลัก (Mg^{2+}, NH_4^+ และ PO_4^{3-}) ได้แก 650 , 172 และ 202 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ พบว่าจะตกตะกอน MAP ได้ดีที่สุดที่ค่าความ

เป็นกรดด่างเท่ากับ 9 ซึ่งสามารถลดสารอาหาร Mg^{2+}, NH_4^+ และ PO_4^{3-} ได้ 66.67%, 50.87% และ 33.40% ตามลำดับ และได้ผลึก MAP 0.1331 g และพบว่าการปรับอัตราส่วนของ Mg^{2+}:PO_4^{3-} เป็น 1:2 สามารถลด Mg^{2+} และ PO_4^{3-} ได้สูงถึง 80.00% และ 90.26% และได้ผลึก 0.45 กรัม โดยการเดินระบบต่อเนื่องในห้องปฏิบัติการนั้นพบว่า ค่าพีเอช การกวนผสม ระยะเวลาในการทำปฏิกริยา และการเติมอากาศทำให้เกิดการตกตะกอนปุ๋ยสตรูไวท์ที่สูงขึ้น และจากการเดินระบบดังกล่าวพบว่า ระยะเวลาในการทำปฏิกริยาของน้ำเสียในถังปฏิกรที่เหมาะสมอยู่ที่ประมาณ 1-2 ชั่วโมง พีเอชที่ 9-10 ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบระบบผลิตปุ๋ยต้นแบบใช้งานจริงได้

ผู้วิจัยได้ออกแบบระบบผลิตปุ๋ยต้นแบบขนาดการผลิต 25 กิโลกรัมต่อวัน ซึ่งได้ติดตั้งที่โรงงานสหมิตรแป้งมัน จังหวัดชลบุรี และได้ทำการเดินระบบเป็นระยะเวลา 2 เดือน พบว่าระบบผลิตปุ๋ยสามารถผลิตปุ๋ยได้ การเดินระบบไม่ยากสามารถออกแบบให้มีการควบคุมการเดินระบบอย่างอัตโนมัติได้ และการทำปฏิริยาผลิตปุ๋ยนั้นเกิดได้รวดเร็ว อย่างไรก็ตามในช่วงการเดินระบบพบว่าปริมาณน้ำไม่คงที บางครั้งโรงงานได้กักขังน้ำนานทำให้เกิดสาหร่ายสีเขียวทำให้เกิดปุ๋ยได้น้อยลง ระบบมีความขัดข้องด้านไฟฟ้า และการควบคุม และปริมาณฝนที่เยอะทำให้การเดินระบบอย่างต่อเนื่องมีปัญหาบ้าง

จากผลการทดลองที่ได้พบว่าต้นทุนการผลิตปุ๋ยเกิดจาก การใช้สารเคมีปรับค่าพีเอช คนงาน ถังปฏิกรณ์ ค่าไฟฟ้าในการเดินระบบ ซึ่งคิดเป็นเงินต้นทุนสารเคมี คือ 4-6 บาทต่อกิโลกรัมปุ๋ยที่ผลิตได้ เมื่อรวมกับค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานอื่น ๆ แล้วต้นทุนผลิตปุ๋ยจะอยู่ที่ประมาณ 10-12 บาทต่อกิโลกรัม นำมาจำลองการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการผลิตปุ๋ยสตรูไวท์ขนาดกำลังการผลิต 300-400 กกต่อวัน ซึ่งรองรับโรงงานที่กำลังการผลิตแป้งมันสำปะหลัง 100 ตันแป้งต่อวัน พบว่าระบบดังกล่าวจะสามารถคืนทุนได้ภายใน 3 ปี เมื่อขายปุ๋ยที่ราคา 26 บาทต่อกิโลกรัม ทำการสำรวจตลาดปุ๋ย ทั้งในและต่างประเทศราคาปุ๋ยที่ขายในท้องตลาดมีราคาที่แตกต่างกันมาก ที่ กิโลกรัมละ 8 บาท หรือราคามากกว่า 100 บาทต่อกิโลกรัมในปุ๋ยแต่ละชนิด ซึ่งได้ทำการทดสอบนำปุ๋ยที่ผลิตได้นั้นพบว่า ปุ๋ยสตรูไวท์มีส่วนประกอบคือ ธาตุโปแทสเซียม แมกนีเซียม ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส และเมื่อมาทดสอบการละลายน้ำพบว่าปุ๋ยสตรูไวท์ที่ผลิตได้มีค่าการละลายน้ำช้า คือ ปล่อยฟอสเฟตมาในปริมาณน้อยอย่างต่อเนื่อง และสามารถทำงานได้ดีที่สภาวะเป็นกลาง พบว่าในระยะยาวนั้น ค่าฟอสเฟตของปุ๋ยสตรูไวท์มีค่าสูงกว่าปุ๋ยชนิดอื่น ๆ ที่อยู่ในท้องตลาด ทั้งนี้ปุ๋ยที่มีอยู่โดยทั่วไปนั้น เป็นปุ๋ยละลายเร็วความเข้มข้นสูง ซึ่งอาจจะมีประโยชน์ในระยะยาว ในกรณีที่พืชต้องการธาตุสารอาหารในปริมาณน้อยอย่างต่อเนื่อง

ผลการวิเคราะห์ด้านสิ่งแวดล้อม พบว่าน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดหรือผ่านการผลิตปุ๋ยสตรูไวท์แล้วนั้นมีคุณภาพที่ดีขึ้น คือ มีค่าปริมาณฟอสเฟตและไนโตรเจนที่เป็นธาตุที่ทำให้พืชน้ำเจริญเติบโตได้เร็วขึ้นลดลง

ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ทางสิ่งแวดล้อมแล้วนั้น วิธีการดังกล่าวนี้นอกจากทำให้ของเสียเป็นผลผลิตหนึ่งของผู้ประกอบการแล้วนั้น ยังสามารถทำให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีคุณภาพที่ดีขึ้น ลดปัญหาสิ่งแวดล้อม และสามารถลดพื้นที่การบำบัดขั้นหลังของโรงงานที่ปัจจุบันใช้พื้นที่เป็นจำนวนมาก

ผลการวิจัยในโครงการการผลิตปุ๋ยสตรูไวท์จากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากโรงงานเกษตรอุตสาหกรรมและฟาร์มสุกร ได้รับการเผยแพร่สู่สาธารณะตามกรอบการนำเดินงาน ดังนี้คือ ๑) ได้ส่งประกวดนวัตกรรม เข้ารอบสุดท้ายของสำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ซึ่งได้มีการนำเสนอโครงการต่อผู้เข้าร่วมงานนวัตกรรมต่อสาธารณะมากมาย และส่วนที่ ๒) ได้จัดสัมนาเผยแพร่ผลการดำเนินงานต่อผู้ประกอบการมีผู้ประกอบการเข้าร่วมการสัมนาโครงการ จำนวน 20 คน รวมทั้งได้จัดเป็นแผนพับข้อมูลเพื่อแจกจ่าย ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะให้ดำเนินโครงการยื่นขอคูปองนวัตกรรมเพื่อพัฒนาระบบต้นแบบระดับโรงงานต่อไป เพื่อเป็นโรงงานผลิตปุ๋ยต้นแบบขนาดที่สามารถนำไปใช้จริงได้

บทคัดย่อ

น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนโดยการผลิตก๊าซชีวภาพยังมีธาตุอาหารอยู่สูง ด้วยการบังคับของกฎหมายผู้ประกอบการจึงไม่สามารถปล่อยน้ำเสียเหล่านี้ลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้เพราะจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชั่น (Eutrophication) ทำได้เพียงปล่อยให้น้ำไหลซึมสู่ดิน เกษตรกรบางส่วนนำไปใช้เพาะปลูก ซึ่งไม่เห็นประโยชน์อย่างเป็นรูปธรรม ปุ๋ยสตรูไวท์ (Struvite) หรือแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต(Magnesium Ammonium Phosphat:MAP) มีสูตรทางเคมีคือ MgNH4PO4 เป็นแนวทางการดึงสารอาหารในน้ำเสียนำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างเป็นรูปธรรม โดยการตกตะกอนของแมกนีเซียมไอออน (Mg2+), แอมโมเนียมไอออน (NH4+) และฟอสเฟตไอออน (PO43-) ในสภาวะที่เหมาะสม มีลักษณะเป็นผลึกสีขาวแกมเหลืองอ่อน หรือน้ำตาลอ่อน ด้วยความสามารถในการละลายที่น้อย (ค่า Ksp≂ 7.08x10-4) (กรมควบคุมมลพิษ, 2554) มีคุณสมบัติเป็นปุ๋ยละลายช้า พืชสามารถใช้ประโยชน์ได้อย่างยาวนาน โดยในงานวิจัยนี้น้ำเสียที่นำมาพิจารณาในการตกผลึก MAP ได้แก่ น้ำที่ออกจากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ(Biogas outlet) น้ำบ่อสุดท้าย(post treatment) และกากตะกอนน้ำเสีย(Sludge) จากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม และฟาร์มสุกร พบว่าน้ำเสียจากกากตะกอนฟาร์มสุกรมีสารอาหารตั้งต้น(Mg2+, NH4+ และ PO43-) มากที่สุด(279, 450 และ 700 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ) แต่เนื่องด้วยหากนำไปติดตั้งบนพื้นที่จริงจำเป็นต้องมีหน่อยกรองเอาตะกอนออก จึงจะนำน้ำเสียมาใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายทำให้ยากต่อการคุ้มทุน น้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมี Mg2+ ที่สูง(1750 มิลลิกรัมต่อลิตร) แต่มี NH4+ และ PO43- เพียง (70 และ 42 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ) อีกทั้งมีค่าความเป็นด่าง(Alkalinity) ที่สูง (3,500-5,700 มิลลิกรัมต่อลิตร) ซึ่งจะส่งผลต่อการปรับความเป็นกรดด่าง (pH)ได้ยากขึ้น และน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มจะมีการปนเปื้อนของน้ำมัน จึงไม่เหมาะที่จะนำมาตกตะกอน MAP จึงพิจารณาน้ำที่ออกจากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพของโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งมีธาตุอาหารหลัก (Mg2+, NH4+ และ PO43-) ได้แก 650 , 172 และ 202 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ พบว่าจะตกตะกอน MAP ได้ดีที่สุดที่ค่าความเป็นกรดด่างเท่ากับ 9 ซึ่งสามารถลดสารอาหาร Mg2+, NH4+ และ PO43- ได้ 66.67%, 50.87% และ 33.40% ตามลำดับ และได้ผลึก MAP 0.1331 g และพบว่าการปรับอัตราส่วนของ Mg2+:PO43- เป็น 1:2 สามารถลด Mg2+ และ PO43- ได้สูงถึง 80.00% และ 90.26% และได้ผลึก 0.45 กรัม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rahman et al. (2011), Lui et al. (2011) และ Le Corre et al. (2007)

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทสรุปสำหรับผู้บริหาร	ข
บทคัดย่อ	จ
สารบัญรูปภาพ	ญ
สารบัญตาราง	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
1.4 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	4
1.5 แผนการดำเนินงานการวิจัย	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
2.1.1 ลักษณะน้ำเสียจากฟาร์มสุกร	7
2.1.2 ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง	8
2.1.3 ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม	9
2.1.4 การบำบัดน้ำเสีย (Wastewater Treatment)	10
2.1.5 วัฏจักรไนโตรเจน	11
2.1.6 วัฏจักรฟอสฟอรัส	13

2.1.7 pH-Speciation Diagram 15

2.1.8 ความกระด้างของน้ำ 16

2.1.9 การตกตะกอน (sedimentation) 17

2.1.10 ปุ๋ย 20

2.1.11 ปุ๋ยแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต 21

(Magnesium ammonium phosphate, MAP)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 22

บทที่ 3 อุปกรณ์ สารเคมี และขั้นตอนการทดลอง 27

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี 27

3.1.1 สารเคมี 27

3.1.2 วัสดุอุปกรณ์ 27

3.2 วิธีการทดลอง 29

3.2.1 ขั้นตอนการศึกษาและการวิเคราะห์เบื้องต้น 29

3.2.2 การสำรวจโรงงานและเก็บตัวอย่างวิเคราะห์น้ำเสีย 29

บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน 36

4.1 ผลการสำรวจโรงงาน 36

4.2 สมบัติของน้ำเสีย 40

4.2.1 ศักยภาพการผลิตปุ๋ยสตรูไวท์ของโรงงานเกษตร อุตสาหกรรมและฟาร์มสุกร 41

4.3 ผลการจำลองหาสถาวะที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอน ปุ๋ยสตรูไวท์ 44

4.4 ผลการทดลองการผลิตปุ๋ยสตรูไวท์ 45

4.4.1 ผลการทดลองแบบกะ 45

4.4.2 วิเคราะห์ผลการทดลองแบบกะ 51

4.4.3 ผลของการเติมอากาศ 52

4.4.4 ผลการทดลองการผลิตปุ๋ยสตรูไวท์แบบต่อเนื่อง 53

4.5 ผลการทดสอบวิเคราะห์คุณสมบัติปุ๋ย 57

4.6 ผลการทดสอบการละลายน้ำของปุ๋ยสตรูไวท์เทียบกับปุ๋ย 58
อื่นๆ

4.7 ผลการนำปุ๋ยที่ได้ปลูกพืช 60

บทที่ 5 ระบบต้นแบบผลิตปุ๋ยสตรูไวท์การวิเคราะห์ทางเทคนิค เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อม
61

5.1 ระบบต้นแบบผลิตปุ๋ยสตรูไวท์ 61

5.1.1 สถานที่ทดสอบเดินระบบต้นแบบ 61

5.1.2 แนวความคิดการออกแบบระบบต้นแบบสำหรับ 61
การทดลองระดับโรงงาน

5.1.3 การก่อสร้างและติดตั้งระบบต้นแบบ 63

5.1.4 การติดตั้งระบบผลิตปุ๋ยสตรูไวท์ต้นแบบ 64

5.1.5 เดินระบบต้นแบบ 64

5.1.6 สรุปผลการวิเคราะห์ทางเทคนิค 68

5.1.7 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ การตลาดและ
การลงทุน 68

5.2 การวิเคราะห์ทางด้านสิ่งแวดล้อม 70

5.2.1 ขนาดและแนวโน้มของตลาด 71

5.2.2 ตลาดเป้าหมาย 73

5.3 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสิ่งแวดล้อม 78

บทที่ 6 สรุปและอภิปรายผล 79

6.1 การทดสอบระดับห้องปฏิบัติการ 79

6.1.1 สมบัติของน้ำเสีย 79

6.1.2 ผลกระทบของความเป็นกรดด่างที่มีผลต่อการ ตกตะกอน MAP 79

6.1.3 ผลกระทบของอัตราส่วนระหว่าง Mg^{2+} : PO_4^{3-} ที่มีผลต่อการตกตะกอน MAP 80

6.1.4 การทดสอบแบบต่อเนื่อง 80

6.1.5 ระบบต้นแบบผลิตปุ๋ยสตรูไวท์ระดับโรงงาน 81

6.1.6 ผลสรุปทางเทคนิค 81

6.1.7 ผลสรุปทางเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม 82

6.2 ผลผลิต 83

ภาคผนวก ก. รูปภาพ ณ

ภาคผนวก ข. การคำนวณ ท

ภาคผนวก ค. ตารางที่เกี่ยวข้อง ป

งานรายสรุปการเงิน ภ

เอกสารอ้างอิง ม

สารบัญรูปภาพ

		หน้า
รูปที่ 2-1	วัฏจักรไนโตรเจน	13
รูปที่ 2-2	วัฏจักรฟอสเฟต	14
รูปที่ 2-3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างไอออนของ ฟอสเฟต แอมโมเนียม คาร์บอเนต และ pH	16
รูปที่ 2-4	ความสามารถในการละลายและอุณหภูมิ	19
รูปที่ 2-5	ผลึก MAP	28
รูปที่ 3-1	นำน้ำเสียมาจากบ่อบำบัดขั้นหลังของโรงงาน	34
รูปที่ 3-2	การทดลองการผลิตสตรูไวท์ด้วยระบบต่อเนื่องในห้องปฏิบัติการ	34
รูปที่ 4-1	แสดงการสำรวจภาคสนามของโรงแป้งมันสำปะหลัง	36
รูปที่ 4-2	แสดงการสำรวจภาคสนามของโรงแป้งมันสำปะหลัง	38
รูปที่ 4-3	แสดงการสำรวจภาคสนามของโรงงานผลิตน้ำมันปาร์ม และการเก็บตัวอย่าง	38
รูปที่ 4-4	แสดงฟาร์มสุกร	39
รูปที่ 4-5	แสดงรูปแบบระบบบำบัดน้ำเสียของสถานประกอบการต่างๆ ซึ่งประกอบไปด้วยถังรวบรวมน้ำ ระบบบำบัดน้ำแบบไร้อากาศ ระบบดึกกากตะกอน และระบบบำบัดน้ำเสียขั้นหลัง	39
รูปที่ 4-6	แสดงสมดุลมวลฟอสฟอรัส ที่ได้จากการสำรวจโรงงานและเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวิเคราะห์ธาตุสารอาหาร	42
รูปที่ 4-7	ผลการจำลองหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอนปุ๋ยสตรูไวท์โดยใช้โปรแกรมสมดุลทางเคมี MINTEQ	45
รูปที่4-8	(ก) ตะกอนเริ่มจับตัวหลังจากกวนผสมเสร็จ (ข) ตะกอนหลังจากกรองและทำให้แห้ง	46
รูปที่ 4-9	(ก) ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจริง (ข) ปริมาณสารอาหารที่เหลืออยู่	47
รูปที่ 4-10	ตะกอน MAP ที่ความเข้มข้นต่างกัน	49
รูปที่ 4-11	(ก) ตะกอนที่เกิดที่อัตราส่วนต่างกัน (ข) ปริมาณสารอาหารที่เหลือหลังจากตกตะกอน	50
รูปที่ 4-12	แสดงพีเอชของน้ำเสียแป้งมันสำปะหลัง หลังจากการเติมอากาศเป็นระยะเวลา 40 นาที	52
รูปที่ 4-13	แสดงผลการลดลองของไอออนต่างๆ ในน้ำที่ค่าพีเอชแตกต่างกัน	53

รูปที่ 4-14	แสดงผลการเติมอากาศต่อการลดลงของไอออนต่างๆ ในน้ำเทียบกับคอลัมน์ที่ไม่ได้เติมอากาศ	55
รูปที่ 4-15	แสดงผลการลดลองของไอออนต่างๆในน้ำ ด้วยการเดินระบบแบบสองขั้นตอน	56
รูปที่ 4-16	แสดงค่าฟอสเฟตไอออนในน้ำที่ค่าพีเอชต่างๆ จากการทดลองแบบ Batch รวมทั้งน้ำหนักของตะกอนที่ผลิตได้	56
รูปที่ 4-17	แสดงค่าฟอสเฟตไอออนในน้ำที่ค่าพีเอชต่างๆ จากการทดลองแบบ Batch รวมทั้งน้ำหนักของตะกอนที่ผลิตได้	57
รูปที่ 4-18	ผลการวิเคราะห์ธาตุโดยใช้เทคนิค EDX ของตัวอย่างน้ำหลังกระบวนการที่มีค่า pH = 9	58
รูปที่ 4-19	แสดงค่าฟอสเฟตไอออนในน้ำที่ค่าพีเอชต่างๆ จากการทดลองแบบ Batch รวมทั้งน้ำหนักของตะกอนที่ผลิตได้	59
รูปที่ 4-20	แสดงค่าฟอสเฟตไอออนในน้ำที่ค่าพีเอชต่างๆ จากการทดลองแบบ Batch รวมทั้งน้ำหนักของตะกอนที่ผลิตได้	60
รูปที่ 5-1	สถานที่ทำการติดตั้งระบบ หรือห้างหุ้นส่วนจำกัดสหมิตรแป้งมันชลบุรี	62
รูปที่ 5-2	สถานที่ทำการติดตั้งระบบ หรือห้างหุ้นส่วนจำกัดสหมิตรแป้งมันชลบุรี	63
รูปที่ 5-3	ระบบต้นแบบผลิตปุ๋ยสตรูไวท์	63
รูปที่ 5-4	แสดงการติดตั้งระบบต้นแบบผลิตปุ๋ยสตรูไวท์	64
รูปที่ 5-5	แสดงการตกผลึกปุ๋ยสตรูไวท์ระหว่างการเดินระบบ	65
รูปที่ 5-6	แสดงการสำรวจภาคสนามของโรงงานแป้งมันสำปะหลัง	67
รูปที่ 5-7	ตัวอย่างน้ำเข้า น้ำออกจากถังที่ 1 น้ำออกจากถังที่ 2 และตะกอนของน้ำถังที่ 1 และ 2	68
รูปที่ 5-8	ตัวอย่างน้ำเข้า น้ำออกจากถังที่ 1 น้ำออกจากถังที่ 2 และตะกอนของน้ำถังที่ 1 และ 2 หลังวางไว้ 2 อาทิตย์ พบว่าน้ำเสียที่ยังไม่ผ่านการบำบัดเปลี่ยนเป็นสีเขียว เนื่องจากการเจริญเติบโตของพืชน้ำ	78

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 1-1	ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	4
ตารางที่ 1-2	แผนการดำเนินงาน	5
ตารางที่ 2-1	แสดงอัตราการใช้น้ำ อัตราการเกิดน้ำเสีย และค่าความสกปรกของน้ำเสียที่จำแนกตามประเภทสุกร	7
ตารางที่ 2-2	แสดงค่าเฉลี่ยของลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ออกจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลั	8
ตารางที่ 2-3	ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม	9
ตารางที่ 2-4	ชนิดของน้ำตามความกระด้าง	16
ตารางที่ 2-5	ปริมาณแคลเซียมบ่งบอกระดับความสมบูรณ์	17
ตารางที่ 3-1	สรุปวิธีการทดลอง	29
ตารางที่ 4-1	แสดงรายชื่อสถานประกอบการที่ได้ทำการสำรวจโรงงานและเก็บตัวอย่างน้ำ	37
ตารางที่ 4-2	สมบัติของน้ำเสียของน้ำเสียจากโรงงาน ก., ข., ค., และ ง.	41
ตารางที่ 4-3	แสดงความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ในน้ำเสียชนิดแตกต่างกัน	43
ตารางที่ 4-4	แสดงสัดส่นโมล่าของไอออนต่างๆในน้ำเสีย	43
ตารางที่ 4-5	น้ำหนักตะกอนที่เกิดขึ้นจริง	46
ตารางที่ 4-6	สารอาหารที่เหลืออยู่ในของเหลว	47
ตารางที่ 4-7	น้ำหนักตะกอนที่เกิดขึ้นจริง	49
ตารางที่ 4-8	ปริมาณสารอาหารที่เหลือ	50
ตารางที่ 5-1	การเดินระบบต้นแบบ	66
ตารางที่ 5-2	ราคาระบบขนาดโรงงาน	69
ตารางที่ 5-3	ราคาปุ๋ย	73

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยในปัจจุบันมีการทำเกษตรกรรม เช่น การเลี้ยงสัตว์ การเพาะปลูกพืชในปริมาณมาก ดินในการเพาะปลูกนั้น จากการสำรวจพบว่าดินทั่วโลกมีปริมาณฟอสฟอรัสน้อยมากไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช (คณะวิทยาศาตร์ มหิดล, 2558) ส่งผลให้มีการนำปุ๋ยฟอสเฟตมาใช้ในการเพาะปลูกพืชเป็นจำนวนมากเพื่อชดเชยฟอสฟอรัสที่ขาดหายไปและเพิ่มธาตุอาหารให้กับพืช วัตถุดิบธรรมชาติที่นำมาผลิตปุ๋ยฟอสเฟตนั้นคือแร่หินฟอสเฟต (Sylvia Kratz et al, 2558) ซึ่งเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่ใช้แล้วหมดไป ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ในประเทศไทยมีการค้นพบแร่หินฟอสเฟตในจังหวัดร้อยเอ็ด กาญจนบุรี ลำพูน เพชรบุรีและราชบุรี รวมกันประมาณ 5 แสนตัน นอกจากนี้ยังมีหินฟอสเฟตที่เกิดจากมูลค้างคาว (guano phosphate rock) ตามในถ้ำ (gofertilizerplus, 2556) แต่แร่หินฟอสเฟตที่พบนั้นมีปริมาณไม่มากพอที่จะนำไปผลิตปุ๋ยฟอสเฟตได้ อีกทั้งคุณภาพของแร่หินฟอสเฟตไม่ได้อยู่ในเกณฑ์ระดับสากล และประเทศไทยยังมีปัญหาในด้านการผลิตคือ ไม่สามารถผลิตแม่ปุ๋ยใช้เอง ต้องพึ่งวัตถุดิบหลักและเทคโนโลยีจากต่างประเทศ และความต้องการปุ๋ยฟอสเฟตในประเทศไทยมีแนวโน้มเติบโตมากขึ้น ประเทศไทยจึงมีการนำเข้าปุ๋ยฟอสเฟต ปีละประมาณห้าแสนตัน จากประเทศอเมริกา มอร็อคโค จีน และจากประเทศอื่น ๆ บ้าง (สมาคมการค้าปุ๋ยและธุรกิจการเกษตรไทย, 2544) ด้วยเหตุนี้ประเทศไทยจึงประสบกับปัญหาต้นทุนปุ๋ยราคาสูงทำให้ปุ๋ยในประเทศมีราคาแพง เกษตรกรได้รับความเดือดร้อนจากราคาต้นทุนปุ๋ยสูง ส่งผลให้ผลผลิตที่ได้จากเกษตรกรรมมีราคาสูงตามไปด้วย จึงได้มีการผลิตปุ๋ยสตรูไวท์(Struvite)หรือแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต(Magnesium Ammonium Phosphate, MAP) ทดแทนปุ๋ยฟอสเฟตซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการนำเข้าปุ๋ยและลดปริมาณการนำเข้าปุ๋ยจากต่างประเทศได้

การตกผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต (magnesium ammonium phosphate, MAP) จากน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน เป็นกระบวนการนำแร่ธาตุซึ่งได้แก่ แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) แอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) และฟอสเฟตไอออน (PO_4^{3-}) ซึ่งเหลืออยู่ในน้ำทิ้งก่อนปล่อยออกสู่ธรรมชาตินำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ ลักษณะของผลึกมีลักษณะสีขาวปนเหลืองอ่อนหรือน้ำตาลอ่อน ขนาดของผลึกมีขนาดเล็กใหญ่แตกต่างกัน อาจพบการสะสมของผลึก MAP ในรูปตะกรันตามชิ้นส่วนต่างๆของระบบบำบัดน้ำเสีย(กระทรวงพลังงาน, 2558) ดังนั้นจึงต้องมีการกำจัดออก การใช้ผลึก MAP นิยมใช้เป็นปุ๋ยทางการเกษตรเรียกว่าปุ๋ยละลายช้า(เพราะความสามารถในการละลายน้อย) และมีคุณสมบัติเป็นปุ๋ยเคมี โดย

สามารถใช้ได้ในปริมาณมากในครั้งเดียว หรือนำไปผสมกับปุ๋ยชนิดอื่นเพื่อให้ได้สัดส่วนตามที่พืชต้องการ โดยสามารถใช้ได้ทั้ง พืชยืนต้น พืชดอก ไม้ประดับและนาข้าวซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจของไทย

การผลิตปุ๋ย MAP ในประเทศไทยหลายหน่วยงานเริ่มให้ความสนใจโดยสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย(วว.) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีได้ทำการวิจัยและพัฒนาการเพิ่มมูลค่าน้ำเสียโดยการผลิตปุ๋ย MAP โดยใช้หลักการนำแร่ธาตุที่มีประโยชน์ในน้ำเสียหลังจากผ่านการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนมาใช้ใหม่(ผู้จัดการออนไลน์, 2557) น้ำเสียที่จะนำมาตกตะกอน MAP ควรจะมีแร่ธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสูงโดยเฉพาะน้ำเสียจากภาคการเกษตร น้ำเสียจากชุมชน และน้ำเสียจากอุตสาหกรรมทางการเกษตร ในต่างประเทศได้มีการศึกษาเรื่องนี้อย่างจริงจัง ยกตัวอย่างเช่น ประเทศญี่ปุ่นสร้างโรงบำบัดน้ำเสียชุมชน Unitika, Hiagari Sewage treatment plant ประเทศออสเตรเลียติดตั้งที่ oxley creek WWTP Brisbane ประเทศสหรัฐอเมริกาติดตั้งที่ Sacramento Regional WWTP และประเทศอิตาลีติดตั้งที่ Treviso WWTP (พัทธนันท์ นาถพินิจ,2559) โดยจะรวบรวมน้ำเสียจากชุมชนมาบำบัดเพื่อนำมาตกผลึก MAP ผลิตเป็นสินค้าวางขายตามท้องตลาดสร้างรายได้ให้ตนเอง

ประเทศไทยมีผู้ประกอบการด้านฟาร์มสุกรจำนวนมาก น้ำเสียจากฟาร์มสุกรส่วนใหญ่เป็นน้ำที่ใช้ชะล้างโรงเลี้ยงหมู ซึ่งจะมีการปนเปื้อนของมูลสัตว์และเป็นแหล่งของสารอาหารซึ่งหากปล่อยสู่ธรรมชาติจะส่งผลต่อระบบนิเวศ ทำให้แหล่งน้ำเสื่อมโทรม เกิดการเจริญเติบโตของพืชน้ำอย่างรวดเร็ว หรือเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชั่น (Eutropication) ดังนั้นจึงต้องมีการบำบัดน้ำเสียเพื่อกำจัดสารอาหารในน้ำเสียให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งสารอาหารที่พบในน้ำเสียนั้นพบว่ามีปริมาณของไนโตรเจน (total kjeldahl nitrogen, TKN) (ตรองรัก บุญเติม, 2552) และปริมาณฟอสฟอรัส (ณัฐทิมา โทขันธ์, 2554) ในปริมาณที่มากจึงเหมาะที่จะนำสารอาหารเหล่านี้มาใช้ใหม่โดยการตกตะกอนเป็นผลึก MAP ขณะเดียวกันน้ำเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังและโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม พบว่ามีลักษณะที่ใกล้เคียงกับน้ำเสียจากฟาร์มสุกร คือมีลักษณะของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่สูง (นันทิยา เปปะตัง, 2550) , (รอบรู้ รังสิเวค, 2558) ดังนั้นน้ำทิ้งจากทั้งสองแหล่งจึงเหมาะที่จะนำมาตกตะกอนผลึก MAP เช่นกัน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อที่จะพัฒนาระบบผลิตปุ๋ยสตรูไวท์จากน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเกษตรและฟาร์มเลี้ยงสัตว์ในประเทศไทย เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาย่อย ดังนี้

1. เพื่อสำรวจ วิเคราะห์คุณสมบัติ องค์ประกอบธาตุสารอาหารของน้ำเสียและตะกอนจากระบบบำบัดไร้อากาศ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของกลุ่มตัวอย่างโรงงานอุตสาหกรรมเกษตรและฟาร์มเลี้ยงสัตว์ในพื้นฐานภาคตะวันออกและตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย จำนวนทั้งหมด ๕ แห่ง
2. เพื่อวิเคราะห์สมดุลมวลของธาตุอาหาร และศึกษาสภาวะที่เหมาะ วิเคราะห์ศักยภาพการตกผลึกสตรูไวท์และคำนวณหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยคอมพิวเตอร์โมเดล
3. เพื่อทดสอบสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอนปุ๋ยสตรูไวท์ โดยทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ โดยมีตัวแปร คือ พีเอช ระยะเวลาการตกตะกอน อัตราส่วนธาตุอาหารต่าง ๆ
4. ก่อสร้างและดำเนินระบบการผลิตปุ๋ยสตรูไวท์ในภาคสนาม ณ โรงงานหรือฟาร์มคัดเลือกสำหรับผลิตปุ๋ยอย่างน้อย ๒๕ กก ต่อวัน
5. ประเมินวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเทคนิค และเศรษฐศาสตร์ ระบบผลิตปุ๋ยสตรูไวท์
6. เผยแพร่องค์ความรู้ที่ได้รับจากโครงการวิจัย

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. รวบรวม ศึกษา วิเคราะห์ข้อมูลทุติยภูมิศักยภาพการผลิตสตรูไวท์จากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแบบไร้อากาศในอุตสาหกรรมเกษตร และฟาร์มปศุสัตว์ต่าง ๆ
2. ศึกษารวบรวมข้อมูลปฐมภูมิโดยการลงภาคสนาม เก็บตัวอย่างน้ำ ข้อมูลปริมาณน้ำและกระบวนการบำบัดน้ำ วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำเสีย ธาตุอาหาร เช่น pH, Mg^{2+}, PO_4^{3-} และ NH_4^+ ก่อนและหลังการบำบัด รวมทั้งตะกอนน้ำเสียจากระบบบำบัดในโรงงานเกษตรอุตสาหกรรมและฟาร์มตัวอย่างในภาคพื้นตะวันออกและตะวันออกเฉียงเหนือที่คัดเลือก จำนวน 5 แห่ง
3. ทำการวิเคราะห์ข้อมูลหาสมดุลมวลของน้ำและธาตุอาหาร เพื่อตรวจสอบเส้นทางการไหลของน้ำ และธาตุอาหารที่มีผลต่อการตกตะกอนสตรูไวท์
4. วิเคราะห์คำนวณ สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการตกผลึกสตรูไวท์โดยการใช้ซอฟแวร์ MINEQL$^+$ ซึ่งจะทำนายค่าดัชนีการละลายของสตรูไวท์ที่คุณภาพน้ำเสียที่กำหนด ทำการเปรียบเทียบสภาวะที่เหมาะสมสำหรับน้ำเสียที่เก็บตัวอย่างมาในแต่ละโรงงานและฟาร์ม คัดเลือกตัวอย่างน้ำที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากค่าใช้จ่ายที่ต้องเติมเข้าไปปรับปรุงสำหรับการตกผลึกสตรูไวท์ในน้ำเสียต่าง ๆ เป็นต้น
5. ทำการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) หาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการตกผลึกสตรูไวท์ในน้ำเสียจริง โดยการเติมสารเคมีเพื่อปรับอัตราส่วนของโมลสาร ค่าพีเอช ให้เหมาะสม ทำการการเติมอากาศ เปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่สภาวะต่าง ๆ

6. ทำการออกแบบถังปฏิกรต้นแบบ (Pilot scale) ทดลองเดินระบบเพื่อผลิตสตรูไวท์ในระดับภาคสนาม ณ โรงงานหรือฟาร์มที่กำหนดทั้งหมด 2 โรงงาน เก็บข้อมูลปุ๋ยสตรูไวท์ที่ผลิตได้ ความยากง่ายในการเดินระบบ ความต่อเนื่องของการผลิต ค่าใช้จ่ายในการเติมสารเคมี เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 2 เดือน
7. วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ขนาด ผลึกหรือผง ส่วนประกอบทางเคมี เช่น สัดส่วนของฟอสเฟตในผลึกสตรูไวท์ที่ผลิตได้ โดยวิธีมาตรฐาน เช่น Scanning Electron Microscope (SEM) และ X-Ray Diffraction (XRD)
8. ทำการทดลองปลูกพืชด้วยปุ๋ยสตรูไวท์ เปรียบเทียบกับปุ๋ยชนิดอื่น ๆ รวมทั้งที่ไม่ได้ใช้ปุ๋ย นำผลการทดลองไปประเมินความเป็นไปได้ทางเทคนิค เศรษฐศาสตร์ เกษตรกรรม และสิ่งแวดล้อม รวมทั้งประเมินศักยภาพการผลิตปุ๋ยสตรูไวท์ระดับโรงงาน
9. จัดสัมมนาวิชาการเพื่อเผยแพร่ความรู้ที่ได้จากโครงการวิจัย ให้คำปรึกษาต่อผู้ประกอบการ โดยการจัดสัมมนาวิชาการ เป็นจำนวน 1 ครั้ง โดยมีผู้เข้าร่วมอย่างน้อย 30 คน
10. รวมระยะเวลาในการศึกษาประมาณ 12 เดือน

1.4 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

ตารางที่ 1-1ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

หัวข้อ	การผลิตปุ๋ยสตรูไวท์จากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากโรงงานเกษตรอุตสาหกรรมและฟาร์มปศุสัตว์(สุกร)
สมมุติฐาน	น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแบบไร้อากาศจากโรงงานเกษตรอุตสาหกรรมและฟาร์มปศุสัตว์มีปริมาณน้ำและธาตุอาหาร ที่เหมาะสำหรับการผลิตปุ๋ยสตรูไวท์
คำถาม	• น้ำเสียชนิดใดมีศักยภาพสำหรับการผลิตปุ๋ยสตรูไวท์ • มวลสารธาตุอาหาร ของน้ำเสียที่ผ่านระบบการบำบัดแบบไร้อากาศ อยู่ที่ใดในระบบ เช่น อยู่ในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว หรือ สะสมอยู่ที่ตะกอนจุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศ • สภาวะใดเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตสตรูไวท์ในน้ำเสียที่คัดเลือก • ปริมาณสตรูไวท์ที่ผลิตได้ เป็นผลึก หรือ เป็นผง พารามิเตอร์น้ำหรือการดำเนินระบบแบบใดเป็นตัวกำหนดคุณลักษณะของปุ๋ยสตรูไวท์ที่ผลิตได้ • ปุ๋ยสตรูไวท์ที่ผลิตได้มีความแตกต่างจากปุ๋ยที่นำเข้าอย่างไรในทางเคมี และการ

	นำไปใช้เพาะปลูกอย่างไร • การผลิตปุ๋ยสตรูไวท์จากน้ำเสียนั้น มีประโยชน์ต่อประเทศไทยอย่างไรในด้านเศรษฐกิจโดยการลดการนำเข้าแม่ปุ๋ยเคมี ทางสิ่งแวดล้อมและสังคมเนื่องจากลดจำนวนฟอสเฟตลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะป้องกันปัญหาสิ่งแวดล้อม มีจุดคุ้มการลงทุนกี่ปี มีความน่าลงทุนอย่างไร

1.5 แผนการดำเนินงานการวิจัย

ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์การทำงานอยู่ในช่วงระยะเวลาระหว่าง 1 ตุลาคม 2559 – 30 กันยายน 2560 โดยมีแผนการดำเนินงานตารางที่ 1-2

ตารางที่ 1-2 แผนการดำเนินงาน

กิจกรรม	**เดือนที่**											
	๑	๒	๓	๔	๕	๖	๗	๘	๙	๐	๑๑	๑๒
ขั้นตอนการสำรวจและรวบรวมข้อมูลของโรงงาน รวบรวมข้อมูลเบื้องต้น คำนวณสมดุลมวลของน้ำและธาตุอาหาร วิเคราะห์ผล คัดเลือกโรงงานอุตสาหกรรม และฟาร์มจำนวน 5 แห่ง												
ขั้นตอนการจัดซื้อสารเคมีและอุปกรณ์ที่จำเป็นต้นใช้ในการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ และทำการประกอบถังปฏิกรณ์สำหรับทำการทดสอบ												
ขั้นตอนการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ โดยจะทำการศึกษาถึงผลของ พีเอช อัตราส่วนโมลของธาตุอาหาร อัตราการเติมอากาศ และระยะเวลาการทำปฏิกิริยา												
ขั้นตอนการออกแบบและติดตั้งระบบถังปฏิกรณ์สำหรับการทดลองภาคสนามขนาดการผลิตปุ๋ย 25 กก ต่อวัน												
ขั้นตอนการเดินระบบอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลาอย่างน้อง 2												

เดือน ในภาคสนาม ณ โรงงานหรือฟาร์มที่กำหนดจำนวน 2 แห่ง												
ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดลอง												
ขั้นตอนการประเมินวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเทคนิค สิ่งแวดล้อม และเศรษฐศาสตร์												
ขั้นตอนสรุปผลและเขียนผลงานวิชาการ												
ขั้นตอนการจัดเผยแพร่สัมมนาทางวิชาการ												

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ลักษณะน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

น้ำเสียที่ได้จากฟาร์มสุกรเป็นสาเหตุสำคัญในการก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม และการปล่อยน้ำเสียจากฟาร์มสุกรลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยตรงจะสร้างปัญหาให้กับระบบนิเวศน์เป็นอย่างมาก (กรมปศุสัตว์, 2547) ซึ่งน้ำเสียส่วนใหญ่จะเกิดมาจากการชะล้างทำความสะอาดคอกสุกรและโรงเรือนสุกร ซึ่งจะมีส่วนปนเปื้อนของมูลสุกร น้ำเสียจากฟาร์มสุกรประกอบด้วยน้ำ 65-85% สารอินทรีย์ 10-25% และสารอนินทรีย์ 10% (กรมควบคุมมลพิษ, 2556)

ตารางที่ 2-1 แสดงอัตราการใช้น้ำ อัตราการเกิดน้ำเสีย และค่าความสกปรกของน้ำเสียที่จำแนกตามประเภทสุกรที่เลี้ยง

ประเภทสุกร	อัตราการใช้น้ำ (ลิตร/ตัว/วัน)	อัตราการเกิดน้ำเสีย(ลิตร/ตัว/วัน)	ค่าความสกปรกของน้ำเสีย (มิลลิกรัม/ลิตร)			
			ค่าบีโอดี	ค่าซีโอดี	ของแข็งแขวนลอย	ทีเคเอ็น
สุกรพ่อ-แม่พันธุ์ (5-8 เดือน)	92	64	800	1,700	900	350
สุกรขุน (3-5 เดือน)	48	24	3,500	7,400	4,700	700
สุกรอนุบาล (แรกเกิด-3 เดือน)	32	20	2,500	5,400	3,000	350

ที่มา : คู่มือการประเมินปริมาณน้ำเสียและปริมาณมลพิษจากการเลี้ยงสุกร (2553)

จากข้อมูลในตารางที่ 2-1 พบว่าสุกรพ่อ-แม่พันธุ์ (5-8 เดือน) มีอัตราน้ำเสียมากที่สุดรองลงมาคือสุกรขุน(3-5 เดือน) และสุกรอนุบาล(แรกเกิด-3 เดือน) ตามลำดับ ในขณะที่น้ำเสียจากสุกรขุนจะมีค่าความสกปรกในรูปของปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ต้องการใช้ในการย่อยสลายอินทรีย์สาร(Biochemical Oxygen Demand, BOD) มากกว่าน้ำเสียจากสุกรอนุบาลและน้ำเสียจากสุกรพ่อ-แม่พันธ์ตามลำดับ น้ำเสียเหล่านี้ยังส่งกลิ่นเหม็นรบกวนแก่ผู้ที่อยู่บริเวณใกล้เคียง จึงจำเป็นต้องนำน้ำเสียเข้าสู่กระบวนการบำบัดน้ำเสียเพื่อให้ได้คุณภาพตามมาตรฐานน้ำทิ้งที่กรมควบคุมมลพิษได้กำหนดไว้

ซึ่งการจัดการน้ำเสียจะแตกต่างกันไปในแต่ละฟาร์ม โดยทั่วไปจะใช้การบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนเพื่อให้ได้มีเทนเป็นผลพลอยได้

2.1.2 ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง

ในกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังนั้นจะก่อให้เกิดน้ำเสียจากแต่ละกระบวนการเป็นจำนวนมากซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยน้ำเสียจะเกิดจากกระบวนการล้าง การปอกเปลือก และการสกัดแป้ง โดยทั่วไปแป้งมันสำปะหลัง 1 ตัน ก่อให้เกิดน้ำเสียประมาณ 10 – 20 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งน้ำเสียนี้มีความสกปรกของสารอินทรีย์สูง ประกอบไปด้วยปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ต้องการใช้ในการย่อยสลายอินทรีย์สาร(Biochemical Oxygen Demand, BOD) ประมาณ 55 – 200 กิโลกรัม ปริมาณของออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องใช้สำหรับทำปฏิกิริยาเคมี (Oxidation) กับสารอินทรีย์(Chemical Oxygen Demand, COD) ประมาณ 130 - 400 กิ โลกรัม ปริมาณสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ(Suspended Solids, SS) ประมาณ 40 – 140 กิโลกรัม ฟอสฟอรัสทั้งหมด(total phosphate, TP) ประมาณ 0.2 - 0.6 กิ โลกรัม และไนโตรเจนทั้งหมด (total nitrogen, TN) ประมาณ 3 - 10 กิโลกรัม นอกจากนี้กระบวนการผลิตยังก่อให้เกิดของเสียในรูปของแข็งได้แก่ เปลือก ราก และกากมันสำปะหลังอีกด้วย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549)

ตารางที่ 2-2 แสดงค่าเฉลี่ยของลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ออกจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง

พารามิเตอร์	โรงงานขนาดเล็ก	โรงงานขนาดกลาง	โรงงานขนาดใหญ่	มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม
pH	4.75	4.69	6.33	5.5-9.0
COD	13,000	15,000	19,300	400
BOD	6,465	10,555	12,645	60
TKN	228	248	512	200

TS	13,030	12,550	19,845	-
SS	7,445	5,790	6,990	150
TDS	5,580	6,820	12,850	5,000

หมายเหตุ : ทุกหน่วยมีค่า (มิลลิกรัมต่อลิตร) ยกเว้นค่าความเป็นกรดด่าง

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม

ทั้งนี้น้ำเสียเหล่านี้จะต้องผ่านกระบวนการบำบัดเสียก่อนปล่อยออกสู่ธรรมชาติ ซึ่งวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนซึ่งจะสามารถลดน้ำเสียให้เหลือเพียง 2% เมื่อเทียบกับน้ำเสียจากตอนต้น

2.1.3 ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

ในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มจะมีน้ำเสียเกิดขึ้น เนื่องมาจากมีการใช้น้ำเป็นจำนวนมากในกระบวนการผลิต น้ำเสียที่ได้จากการสกัดน้ำมันปาล์มนั้นจะมีความหนืดเป็นของเหลวสีน้ำตาลประกอบไปด้วยน้ำประมาณ 95-96% น้ำมันประมาณ 0.6-0.7% ของแข็งทั้งหมด(total solid, TS) ประมาณ 4-5% (รวมถึงของแข็งแขวนลอย(total solids, TS) ประมาณ 2-4% ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นเศษเล็กเศษน้อยจากผลไม้ มีสภาพเป็นกรดค่าความเป็นกรด(pH) อยู่ที่ 4-5 (G.D. Najafpour et al.,2005) และน้ำทิ้งที่ได้จากการสกัดน้ำมันปาล์มจะประกอบด้วย น้ำทิ้งจากบ่อรวบรวมน้ำเสีย น้ำทิ้งจากหม้อฆ่าเชื้อ และน้ำทิ้งจากเครื่องดีแคนเตอร์ โดยลักษณะน้ำทิ้งจากแหล่งต่างๆจะแสดงในตารางดังนี้ (อรัญ หันพงศ์กิตติกูลา และคณะ, 2554)

ตารางที่ 2-3 ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

พารามิเตอร์	น้ำทิ้งจากหม้อฆ่าเชื้อ	นำทิ้งจากเครื่องดีแคนเตอร์	น้ำทิ้งจากบ่อรวบรวมน้ำเสีย
สี	น้ำตาลเข้ม	น้ำตาล	น้ำตาล-ดำน้ำตาล
pH	4.05-4.62	4.84-5.35	4.61-4.89
BOD	54.75-60.00	22.80-41.98	21.00-45.38
COD	80.52-115.93	45.36-80.15	38.25-67.57
กรดระเหยง่าย	3.13-5.87	0.99-7.13	1.84-2.27
อัลคาไลน์ (เช่น $CaCO_3$)	0.07-0.20	0.04-1.58	0.09-0.48
จาระบี	0.02-2.45	0.02-1.17	0.00

ของแข็งทั้งหมด (TS)	49.06-88.51	26.38-76.73	25.63-47.24
ของแข็งระเหย (VBS)	46.03	31.34	61.97
สารแขวนลอย (SS)	18.50-52.00	2.60-6.10	2.90-20.30
ไนโตรเจน - แอมโมเนีย	0.03-0.06	0.01-0.07	0.02
- อินทรีย์	0.55-1.17	0.02-1.29	0.52

หมายเหตุ : ทุกหน่วยมีค่า (มิลลิกรัมต่อลิตร) ยกเว้นค่าความเป็นกรดด่าง

ที่มา : Noparat (2009)

2.1.4 การบำบัดน้ำเสีย(Wastewater Treatment)

น้ำเสียที่ออกจากกระบวนการต่างๆ จะมีธาตุอาหารสูง จึงจำเป็นต้องได้รับการบำบัดก่อนปล่อยออกสู่ธรรมชาติ การบำบัดน้ำเสียเป็นการลดหรือกำจัดธาตุอาหารในน้ำให้ได้คุณภาพตามมาตรฐานน้ำทิ้งของกรมอุตสาหกรรม โดยกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบ่งตามลักษณะการกำจัดได้เป็น 4 ประเภท(ชัยศรี สุขสาโรจน์, 2558) คือ

1. วิธีการบำบัดทางกายภาพ
2. วิธีการบำบัดทางเคมี
3. วิธีการบำบัดทางชีวภาพ
4. วิธีการบำบัดทางฟิสิกส์-เคมี

กลไกพื้นฐานในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ไม่ว่าจะเป็นแบบใช้อากาศหรือไม่ใช้อากาศก็ตามจะมีลักษณะเหมือนกันคือเป็นปฏิกิริยาเคมีแบบออกซิเดชันรีดักชัน (รีดอกซ์) ปฏิกิริยารีดอกซ์หมายถึง ปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนเกิดขึ้นระหว่างสารให้อิเล็กตรอนและสารรับอิเล็กตรอน สารให้อิเล็กตรอนในน้ำเสียส่วนใหญ่มักเป็นสารอินทรีย์ ส่วนสารรับอิเล็กตรอนในน้ำเสียมักเป็นสารอื่นๆ ที่ไม่ใช่สารอินทรีย์ เช่น ออกซิเจน(Oxygen,O_2) ไนเตรท(Nitrite, NO_3^-)หรือซัลเฟต(Sulfate, SO_4^{2-}) เป็นต้น(กรมควบคุมมลพิษ, 2544) การถ่ายเทอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์จะได้พลังงานเกิดขึ้นจำนวนหนึ่ง พลังงานที่เกิดขึ้นนี้ส่วนหนึ่งสูญเสียไปในรูปของพลังงานความร้อน อีกส่วนหนึ่งถูกนำไปใช้การดำรงชีวิตและสร้างเซลล์ใหม่ ดังนั้นสารอินทรีย์จึงเป็นทั้งแหล่งพลังงานและแหล่งคาร์บอนของจุลชีพ แต่สารรับอิเล็กตรอนในน้ำเสียมีหลายชนิด ผลของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นก็ต่างกันไปตามชนิดของสารรับอิเล็กตรอนเช่น ถ้าสารรับอิเล็กตรอนเป็นออกซิเจน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาที่เรียกว่า Aerobic Oxidation ถ้าสารรับอิเล็กตรอน

เป็นไนเตรท ก็จะเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันขึ้น เป็นต้น สามารถแบ่งชนิดของปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ของแบคทีเรียออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ตามสารรับอิเล็กตรอน(กรมควบคุมมลพิษ, 2545) คือ

ก. การหมัก (Fermentation) คือ ปฏิกิริยารีดอกซ์ของสารประกอบอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในภาวะที่ไม่มีสารรับอิเล็กตรอนภายนอก(มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2559)

ข. การหายใจ (Respiration) คือ ปฏิกิริยารีดอกซ์ที่มีสารรับอิเล็กตรอนภายนอกเป็นสารรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย ซึ่งสามารถแบ่งย่อยลงไปได้อีก 2 ประเภท

- Aerobic Respiration เป็นการหายใจที่มีโมเลกุลของออกซิเจนเป็นสารรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย

- Anaerobic Respiration เป็นการหายใจที่ไม่ใช้ออกซิเจนเป็นสารรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย สารรับอิเล็กตรอนที่ใช้ในกรณีนี้ได้แก่ ไนเตรท ซัลเฟตหรือคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น

วิธีการบำบัดทางชีวภาพเป็นวิธีบำบัดโดยใช้สิ่งมีชีวิตซึ่งอาจจะเป็นจุลินทรีย์หรือพืชในการบำบัดหรือลดสารอินทรีย์ และใช้วิธีทางชีววิทยาในการบำบัดสารอนินทรีย์ ซึ่งกระบวนการนี้เป็นที่นิยม ตัวอย่างการบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพเช่น การบำบัดสีของโรงงานฟอกย้อม (sirianuntapiboon and saengow, 2004) การดูดซับโลหะ (sirianuntapiboon and chaiyasing, 2000) เป็นต้น

2.1.5 วัฏจักรไนโตรเจน

ไนโตรเจนเป็นธาตุที่สำคัญมากชนิดหนึ่งเพราะเป็นองค์ประกอบของโปรตีนในสิ่งมีชีวิตและยังเป็นธาตุอาหารที่สำคัญสำหรับการเจริญเติบโตของพืช ไนโตรเจนในรูปของก๊าซมีอยู่ในบรรยากาศมากถึง 78% ของอากาศทั้งหมด ซึ่งสิ่งมีชีวิตส่วนใหญ่จะไม่สามารถนำไนโตรเจนไปใช้ได้โดยตรง แต่พืชจะสามารถใช้ไนโตรเจนได้ใน 2 รูปแบบ คือ แอมโมเนียม (ammonium, NH_4^+) และไนเตรท (Nitrate, NO_3^-) เพื่อนำไปสร้างสารประกอบต่างๆภายในเซลล์ สารประกอบไนโตรเจนที่เกี่ยวข้องในน้ำและน้ำเสียแบ่งเป็น 4 ชนิดคือ สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน(Organic Nitrogen) แอมโมเนีย(Ammonia) ไนเตรต(Nitrate) และไนไตร์ต(Nitrite) ซึ่งผลรวมของสารอินทรีย์ไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจนเรียกว่า ทีเคเอ็นไนโตรเจน (Total Kjeldahl Nitrogen, TKN) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2552)

สารอินทรีย์ไนโตรเจน (Organic Nitrogen)

สารอินทรีย์ไนโตรเจนได้แก่ ไนโตรเจนที่พบในสารอินทรีย์ต่างๆ เช่น ยูเรีย กรดอมิโน ถั่วเหลือง มูลสัตว์ เป็นต้น ในบรรดาสารไนโตรเจนทั้งสี่ชนิด สารอินทรีย์ไนโตรเจนอยู่ในรูปรีดิวซ์(จ่ายอิเล็กตรอน) มากที่สุด

แอมโมเนีย(Ammonia)

แอมโมเนียที่อยู่ในน้ำอาจอยู่ในรูปของแอมโมเนียอิสระ (NH_3) หรืออิออนแอมโมเนียม(NH_4^+) เมื่อน้ำมีสภาวะเป็นกลางแอมโมเนียจะอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออน(NH_4^+) แต่เมื่อน้ำมีสภาวะเป็นเบส ไนโตรเจนจะอยู่ในรูปของแอมโมเนียอิสระ

ไนเตรท(Nitrate)

ไนเตรทเป็นรูปของไนโตรเจนที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ได้ เกิดจากสิ่งมีชีวิตปล่อยของเสียที่มีสารประกอบของไนโตรเจนออกมา และเมื่อสิ่งมีชีวิตตายลงโปรตีนภายในสิ่งมีชีวิตจะถูกย่อยสลาย เปลี่ยนเป็นแอมโมเนียซึ่งพืชสามารถนำไปใช้ในการสร้างโปรตีนได้ ถ้าปริมาณมากเกินความต้องการ แอมโมเนียจะถูกออกซิไดส์ไปเป็นไนไตรต์และไนเตรตต่อไป

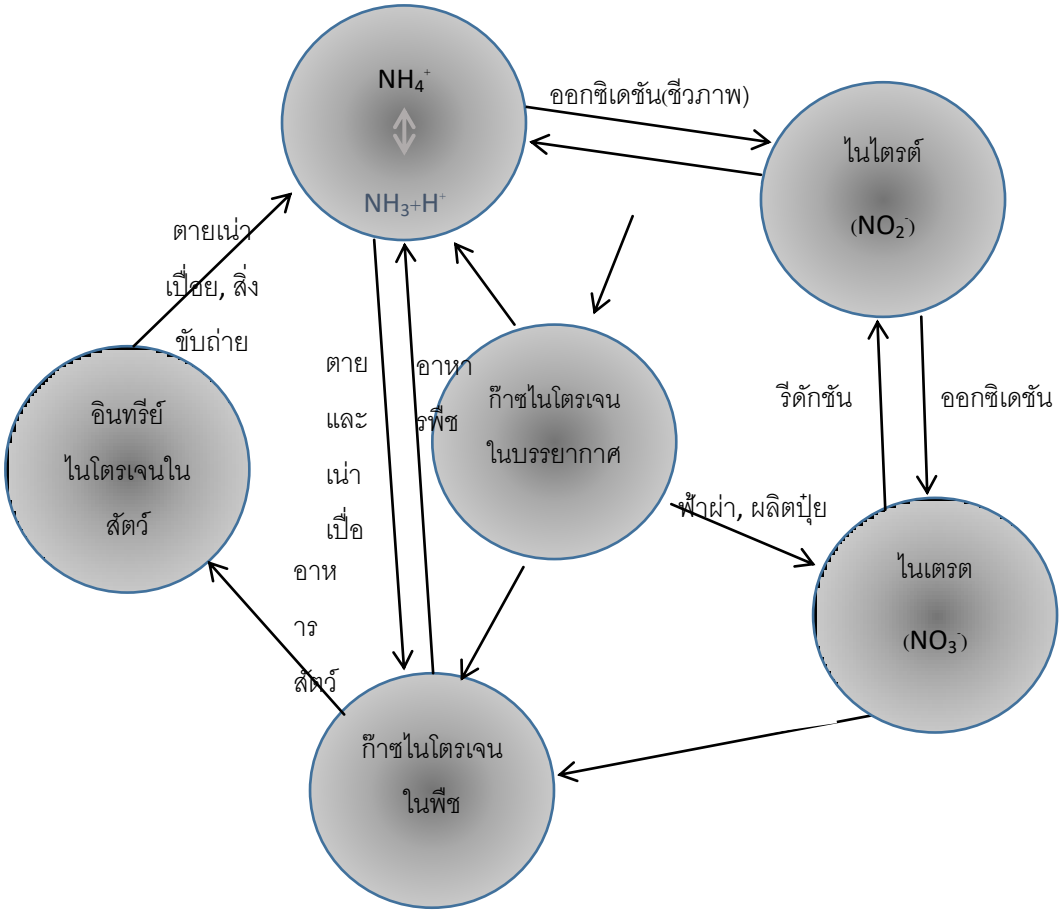
ไนไตรต์(Nitrite)

ไนไตรต์เป็นไอออนที่ไม่คงตัวสามารถเปลี่ยนเป็นไนเตรทได้เร็ว จึงไม่พบความเข้มข้นของไนไตรต์เกิณกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งน้ำผิวดินและน้ำบาดาลแม้กระทั่งในน้ำเสีย ยกเว้นในระบบบำบัดที่ไร้ประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามไอออนของไนไตรต์เป็นพิษต่อสัตว์น้ำจึงจำเป็นต้องได้รับการกำจัด

ไนโตรเจนมีบทบาทในน้ำ เพราะสามารถที่จะเปลี่ยนรูปจากสารอินทรีย์เป็นสารอนินทรีย์ได้โดยไนโตรเจนมีหลายวาเลนซ์แตกต่างกัน 9 ค่า (-3 ถึง 5) คือ

$$NH_3 - N_2H_4 - N_2 - NH_2OH - N_2O - NO - N_2O_3 - NO_2 - N_2O_5$$

แต่ไนโตรเจนที่พบทั่วไปในธรรมชาติมีเพียง 4 ชนิด คือ NH_4^+, N_2, NO_2^- และ NO_3^- ซึ่งเป็นชนิดที่พบในวัฏจักรไนโตรเจน(สุธา ขาวเธียร, 2557) ดังรูปที่ 2-3



ที่มา : กรมอุตสาหกรรม

รูปที่ 2-1 วัฏจักรไนโตรเจน

วัฏจักรไนโตรเจน(Nitrogen Cycle) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงสภาพของธาตุและสารประกอบไนโตรเจนที่แปรเปลี่ยนตามกระบวนการทางเคมีและการย่อยสลายของจุลินทรีย์ เกิดขึ้นได้ทั้งในสิ่งที่มีชีวิตและสิ่งที่ไม่มีชีวิตไม่ว่าจะเป็น ดิน หิน น้ำ อากาศ โดยจะเกิดจากระบบหนึ่งไปสู่อีกระบบหนึ่ง จะหมุนเวียนเปลี่ยนกันจนเกิดเป็นวัฏจักรไนโตรเจน (Nitrogen Cycle) ขึ้นมา

2.1.6 วัฏจักรฟอสฟอรัส

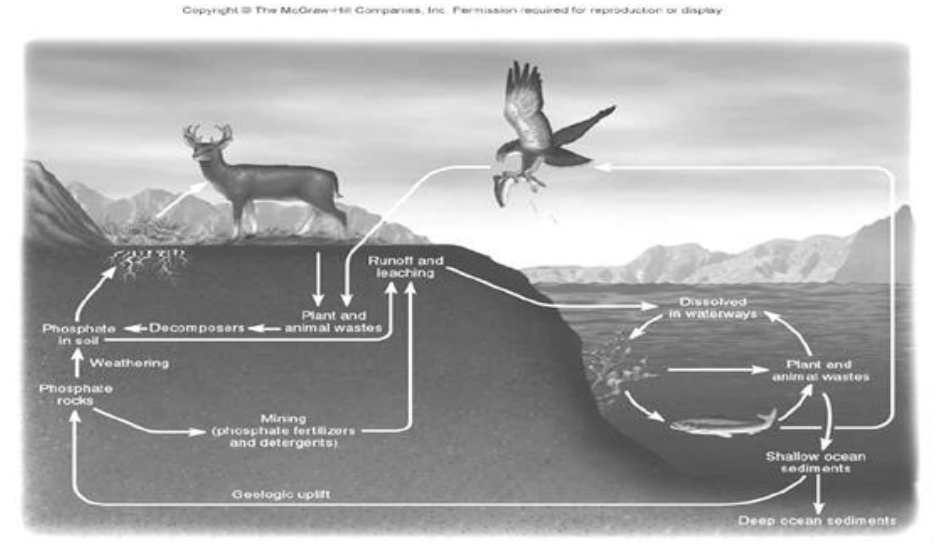
ฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่สำคัญต่อการดำรงชีวิตของ มนุษย์ พืช และสัตว์ เป็นธาตุที่มีอยู่ในธรรมชาติเพียงเล็กน้อย เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางธรณีวิทยา ฟอสฟอรัสจะนำมาหมุนเวียนระหว่างสิ่งที่มีชีวิตและสิ่งที่ไม่มีชีวิตในปริมาณที่จำกัด ฟอสฟอรัสมีบทบาทเกี่ยวกับกระบวนการเมแทบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรต การถ่ายทอดพลังงานและพันธุกรรม แหล่งสำรองของฟอสฟอรัสไม่ได้อยู่ในอากาศ แต่อยู่ในหินอัคนี หินตะกอน เป็นเวลานับล้าน ๆ ปีแล้วถูกทำให้ผุกร่อน(Weathering) โดยอิทธิพลของลม น้ำ และอื่นๆ สลายตัวลงสู่ดินและน้ำ พืชจะสามารถดูดฟอสฟอรัสได้น้อย ถ้าหากดินมีความเป็นกรดสูง (โดยทั่วไปแล้วดินจะมี

ค่าความเป็นกรดด่างระหว่าง 2.2-9.6) เพราะฟอสฟอรัสจะอยู่ในรูปของเหล็กฟอสเฟต หรืออลูมิเนียมฟอสเฟต ซึ่งเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ แต่ถ้าดินมีความเป็นด่างสูง พืชก็สามารถจะดูดฟอสฟอรัสได้น้อยเช่นเดียวกัน เพราะฟอสฟอรัสจะอยู่ในรูปของแคลเซียมฟอสเฟตหรือแมกนีเซียมฟอสเฟต ซึ่งเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้น้อย

ฟอสฟอรัสในน้ำส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารประกอยฟอสเฟตเช่น ออร์โทฟอสเฟต (Orthophosphate), ไพโรฟอสเฟต (Pyrophosphate), โพรีฟอสเฟต (Poly-phosphate), เมตาฟอสเฟต (Metaphosphate) และบางส่วนอยู่ในรูปของสารประกอบอินทรีย์ อาจจะอยู่ในรูปที่ละลายน้ำหรืออยู่ในรูปของซากพืช ซากสัตว์ ซึ่งมีที่มาจากแหล่งต่างๆกัน จัดเป็น growth limiting nutrient ของแหล่งน้ำ ดังนั้นน้ำที่มีปริมาณฟอสเฟตปะปนอยู่มากจะทำให้พืชน้ำมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว อาจจะก่อให้เกิดปัญหาอื่นๆตามมาก็เป็นได้

วัฏจักรฟอสฟอรัส (Phosphorus Cycle) เป็นวัฏจักรที่ไม่ซับซ้อน และมีทิศทางการเคลื่อนไหวไปในทิศทางเดียว เป็นวัฏจักรที่ไม่มีการหมุนเวียนไปสู่บรรยากาศ เพราะฟอสฟอรัสไม่มีสถานะที่เป็นก๊าซ การหมุนเวียนวัฏจักรของฟอสฟอรัสไม่เพียงพอต่อการเพาะปลูกในปริมาณมากๆอย่างเช่นในปัจจุบัน ดังนั้นจึงได้มีการนำปุ๋ยเคมีมาใช้ในการเพาะปลูกแทน ปุ๋ยเคมีจึงถือว่าเป็นแหล่งฟอสฟอรัสที่สำคัญมากที่หนึ่ง (Johnston and Steen, 2000) แต่หินฟอสเฟตที่ซึ่งเป็นวัตถุดิบในการผลิตปุ๋ยเคมี เป็นทรัพยากรธรรมชาติที่ใช้แล้วหมดไป จึงต้องมีการหาแหล่งฟอสฟอรัสที่จะนำมาผลิตปุ๋ยเคมีแหล่งอื่นๆ เช่น น้ำเสียจากฟาร์มสุกร น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมทางการเกษตร เป็นต้น

Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.



ที่มา : ตำราระบบบำบัดมลพิษ

รูปที่ 2-2 วัฏจักรฟอสเฟต

2.1.7 pH-Speciation Diagram

ในการศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อการตกตะกอน MAP จะขึ้นอยู่กับหลายๆ ปัจจัย เช่น ความสามารถในการละลายและความแข็งแรงของไอออน ถ้าความแข็งแรงของไอออนในน้ำเสียมาก ค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาจะน้อย ทำให้ตะกอน MAP ที่ได้ไม่สมบูรณ์เพราะเกิดการรวมตัวของสารอื่นๆที่ไม่ใช่ส่วนประกอบของ MAP ซึ่งฟอสเฟตหลายชนิดไม่สามารถละลายในน้ำได้ที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน โดยโซเดียม(Na) โพแทสเซียม(K) รูบิเดียม(Rd) ซีเซียม(Cs) และแอมโมเนียมฟอสเฟต มีคุณสมบัติละลายน้ำได้ทั้งหมด ฟอสเฟตอื่นๆ ส่วนใหญ่ละลายได้เล็กน้อยหรือไม่ละลายในน้ำ ตามกฎแล้วไฮโดรเจนและไดไฮโดรเจนฟอสเฟตจะละลายได้ดีกว่าฟอสเฟตที่คล้ายคลึงกันเล็กน้อย ฟอสเฟตในน้ำมีอยู่ 4 รูปแบบคือ ในสภาวะพื้นฐานรูปแบบคือ PO_4^{3-} จะมีอิทธิพลเหนือกว่า ในขณะที่สภาวะพื้นฐานที่อ่อนลงมาคือ ไฮโดรเจนฟอสเฟตไอออน (HPO_4^{2-}) ส่วนที่เป็นที่แพร่หลายในสภาวะกรดอ่อนคือ ไดไฮโดรเจนฟอสเฟตไอออน($H_2PO_4^-$) และรูปแบบที่เป็นปกติมากที่สุด ในสภาวะที่เป็นกรดอย่างมากคือ ไตรไฮโดรเจนฟอสเฟตไอออน (H_3PO_4) เป็นรูปแบบหลัก

พิจารณาทั้งสามปฏิกิริยาสมดุล :

$$H_3PO_4 \rightleftharpoons H^+ + H_2PO_4^- \qquad 2\text{-}3$$

$$H_2PO_4^- \rightleftharpoons H^+ + HPO_4^{2-} \qquad 2\text{-}4$$

$$HPO_4^{2-} \rightleftharpoons H^+ + PO_4^{3-} \qquad 2\text{-}5$$

ค่าคงที่ที่สอดคล้องกันที่ 25 ° C (โมล / ลิตร) คือ :

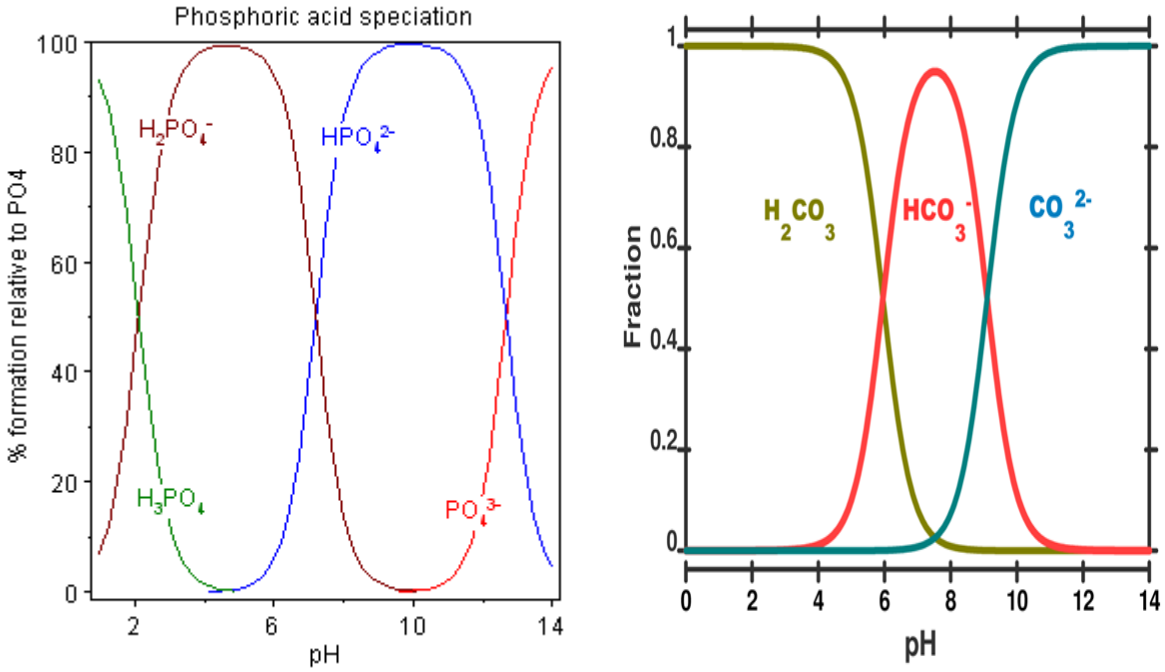
$$K_1 = \frac{[H+][H2PO4-]}{[H3PO4]} \approx 7.5 \times 10^{-3} \qquad (pK_1 \approx 2.12)$$

$$K_2 = \frac{[H+][HPO42-]}{[H2PO4-]} \approx 6.2 \times 10^{-8} \qquad (pK_2 \approx 7.21)$$

$$K_3 = \frac{[H+][PO43-]}{[HPO42-]} \approx 2.14 \times 10^{-13} \qquad (pK_2 \approx 12.67)$$

จากรูปที่ เป็นแผนภาพ pH-Speciation Diagram โดยใช้ค่า pK เหล่านี้แสดงให้เห็นถึง 3 ส่วนที่แตกต่างกัน ผลคือ H_3PO_4 $H_2PO_4^-$ และ HPO_4^{2-} ทำหน้าที่เป็นกรดอ่อนที่ที่แยกจากกัน เนื่องจากค่าพีเอชต่อเนื่องกันมากกว่า 4 สำหรับกรดแต่ละชนิด pH ที่การทำให้เป็นกลางจะเท่ากับค่า pK ของกรด บริเวณที่มีกรดอยู่ในสมดุลกับ conjugate base ของมันจะถูกกำหนดโดยค่าความเป็นกรด – ด่าง $\approx$ pK ± 2 ดังนั้นค่า pH

ของบริเวณทั้งสามจะอยู่ที่ประมาณ 0-4, 5-9 และ 10-14 นี่เป็นอุดมคติเพราะถือว่าค่าคงที่ของไอออนิกคงที่ ซึ่งจะไม่ถือได้ในความเป็นจริงที่ค่า pH ต่ำมากและสูงมาก



รูปที่ 2-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างไอออนของ ฟอสเฟต แอมโมเนียม คาร์บอเนต และ pH

2.1.8 ความกระด้างของน้ำ

น้ำกระด้าง หมายถึง น้ำที่ประกอบด้วยไอออนของแคลเซียมและแมกนีเซียม ซึ่งอยู่ในรูปเกลือไฮโดรเจนคาร์บอเนต คลอไรด์และซัลเฟต น้ำกระด้างจะมีแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ น้ำกระด้างชั่วคราว เป็นน้ำกระดางที่เนื่องมาจากเกลือไฮโดรเจนคารบอเนต เชน $Ca(HCO_3)_2$ และ $Mg(HCO_3)_2$ เมื่อนำมาตม จะเกิดตะกอนที่อยูในรูปของ $CaCO_3$ และ $MgCO_3$ และ น้ำกระด้างถาวร เป็นน้ำกระดางที่เกิดเนื่องจากเกลือคลอไรดและเกลือซัลเฟต เมื่อนำมาตมก็จะไมสามารถตกตะกอนแยกแคลเซียมและแมกนีเซียมออกมาได

1) ชนิดของน้ำแบ่งตามความกระด้าง

ตารางที่ 2-4 ชนิดของน้ำตามความกระด้าง

ชนิดของน้ำ	**ความกระด้าง(mg/L as $CaCO_3$)**
น้ำอ่อนมาก	0-10
น้ำอ่อน	11-75
น้ำกระด้างเล็กน้อย	76-100

น้ำกระด้างปานกลาง	101-200
น้ำกระด้าง	201-300
น้ำกระด้างมาก	มากกว่า 300

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม,2551

2) แคลเซียมและแมกนีเซียม

แคลเซียม

แคลเซียม เป็นตัวหลักที่ทำใหเกิดความกระดางของน้ำโดยจะสามารถทำปฏิกิริยากับอิออนลบบางตัวในน้ำเกิดเปนตะกรันขึ้นได เมื่อน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น ตะกรันในหมอน้ำเกิดขึ้นจากแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และแคลเซียมซัลเฟต (CaSO) แคลเซียมสามารถใชเปนตัวชี้วัดความอุดมสมบูรณของแหลงน้ำได ถาแหล่งน้ำมีปริมาณแคลเซียมนอยกวา 10 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำนั้นจะจัดวามีความอุดมสมบูรณต่ำ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551)

ตารางที่ 2-5 ปริมาณแคลเซียมบ่งบอกระดับความสมบูรณ์

ปริมาณแคลเซียม (mg/L)	**ความอุดมสมบูรณ์**
<10	ต่ำ
10-25	ปานกลาง
>25	สูง

แมกนีเซียม

แมกนีเซียมจะมีปริมาณนอยกวาแคลเซียมในแหลงน้ำ น้ำกระดางจะมีแมกนีเซียมอยู่ประมาณ 35% ของธาตุประจุบวก ซึ่งน้ำกระดางนี้จะมีอัตราสวนแมกนีเซียมต่อแคลเซียม(Mg/Ca) สูงขึ้น และโดยมากแมกนีเซียมจะละลายอยูในรูปของ $MgCO_3$ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม,2551)

2.1.9 การตกตะกอน (sedimentation)

การตกตะกอน(sedimentation) เป็นกระบวนการแยกสารโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก ไอออนที่สนใจหรือต้องการแยกสารจะอยู่ในรูปของเหลว ซึ่งจะถูกทำให้อยู่ในรูปของแข็งหรือตะกอนโดยการรวมตะกอน (flocculation)

การรวมตะกอน(flocculation) เป็นการดึงอนุภาคเล็กๆ ที่แขวนลอยอยู่ในของเหลวให้เกิดการรวมตัวกัน โดยใช้อนุภาคที่มีประจุตรงข้ามหรือสารรวมตะกอน(flocculant) ในการดึงอนุภาคให้รวมตัวกันเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่เกิดเป็นตะกอน(floc) โดยถ้าความหนาแน่นของตะกอนมากกว่าของเหลว ตะกอนก็จะตกลงสู่ด้านล่าง แต่ถ้าความหนาแน่นของตะกอนน้อยกว่าของเหลวตะกอนก็จะลอยขึ้นสู่ด้านบน

1) ความสามารถในการละลาย

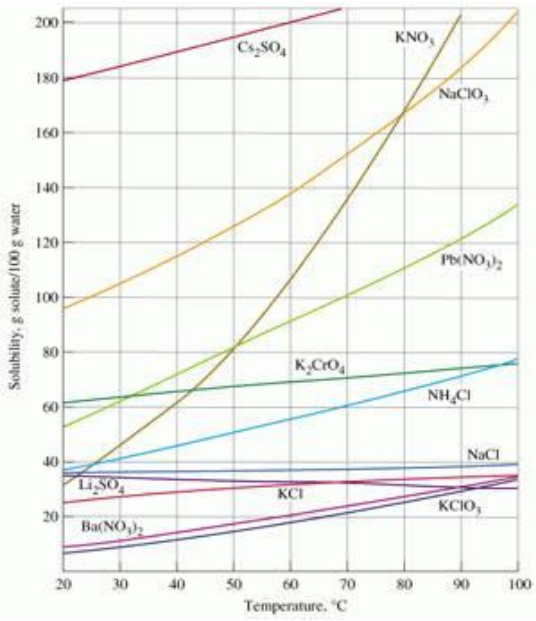
ของแข็งสามารถละลายน้ำได้ในระดับที่แตกต่างกันบางชนิดละลายน้ำได้น้อย บางชนิดละลายน้ำได้มาก โดยความสามารถในการละลายจะบอกถึงความสามารถในการแตกตัวเป็นไอออนให้สารละลายนั้น ผลคูณของความเข้มข้นของไอออนที่แตกตัวจากของแข็งนั้นๆ เรียกว่า Solubility Product Constant (K_{sp}) ซึ่งถูกกำหนดให้เป็นค่าที่ใช้บ่งบอกความสามารถในการละลายของสารหนึ่งๆ โดยสารที่มีค่า K_{sp} มาก จะเป็นสารที่ละลายได้ดี ส่วนสารที่มีค่า K_{sp} น้อย จะมีความสามารถในการละลายน้อยกว่า ซึ่งจะเป็นผลดีต่อการตกตะกอน เพราะเมื่อสารไม่ละลายน้ำ ขนาดของสารจะมีขนาดใหญ่ ทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นตะกอนได้ง่าย

ความสามารถในการเกิดตะกอนขึ้นกับปัจจัยดังนี้

- อุณหภูมิ
- ความถ่วงจำเพาะ
- ขนาดอนุภาค
- ความเป็นกรดด่าง(pH)

2) อุณหภูมิ (temparatus)

โดยอุณหภูมิจะส่งผลต่อปฏิกิริยาโดยตรง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการละลายก็จะเพิ่มมากขึ้น เมื่อปืนปฏิกิริยาดูดความร้อนทำให้การตกตะกอนลดลง อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนจะแตกต่างกันไปตามชนิดของไอออน อย่างไรก็ตามเมื่อปฏิกิริยาเป็นแบบคายความร้อนอุณหภูมิจะไม่มีผลต่อการละลาย หรืออาจส่งผลให้การละลายน้อยลง



ที่มา http://www.satriwit3.ac.th/external_newsblog.php?links=1286

รูปที่ 2-4 ความสามารถในการละลายและอุณหภูมิ

จากรูปจะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แนวโน้มของการละลายสารจะเพิ่มมากขึ้นโดยสารที่มีความชันมาก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิแนวโน้มการดูดความร้อนจะสูงการละลายจึงสูง สารที่มีความชันน้อยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิแนวโน้มการดูดความร้อนจะน้อย ดังนั้นการละลายจะน้อย ซึ่งเป็นผลดีต่อการตกตะกอน

3) ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)

ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) จะแปรผันตรงกับค่าความหนาแน่น ถ้าความหนาแน่นมากจะส่งผลให้อนุภาคใกล้ชิดกันเกิดแรงดึงดูดระหว่างอนุภาค(ion attractions) การรวมตะกอนจึงเกิดได้ง่ายและตามที่กล่าวไว้ข้างต้นคือ เมื่อค่าความหนาแน่นของตะกอนมากกว่าสารละลายจะทำให้สารตกลงสู่ก้นถังตกตะกอน

4) ขนาดอนุภาค

อนุภาคแต่ละอนุภาคจะมีขนาดแตกต่างกัน อนุภาคที่มีขนาดเล็กแรงดึงดูดและแรงผลักกันจะส่งผลแรงกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ โดยส่วนมากแรงผลักกันจะมีขนาดมากกว่าแรงดึงดูด อนุภาคที่มีขนาดเล็กจึงลอยอยู่ในสารละลาย ในขณะที่อนุภาคที่มีขนาดใหญ่แรงผลักกันจะมีน้อยและเนื่องด้วยขนาดที่ใหญ่จึงสามารถจมลงตกตะกอนได้เอง

นอกจากนี้ยังจะมีปัจจัยอื่นๆอีก เช่น ความดันยิ่งจะมีผลต่อการเกิดตะกอนในสภาวะก๊าซ ชนิดของของเหลวถ้าของเหลวต่างชนิดกันความหนืดจะต่างกัน ของเหลวที่มีความหนืดน้อยจะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ได้ดี ซึ่งสองปัจจัยที่กล่าวมานี้ส่งผลกระทบต่อการตกตะกอนเล็กน้อย จึงไม่ขอกล่าวถึง ณ ที่นี้

2.1.10 ปุ๋ย

ปุ๋ย หมายถึง สารหรือสิ่งที่เติมลงไปในดิน เพื่อปลดปล่อยธาตุอาหารให้แก่พืชโดยเฉพาะไนโตรเจน(Nitrogen, N) ฟอสฟอรัส(Phosphorus, P) และโพแทสเซียม(Potassium, K) เป็นต้น ให้พืชได้รับอย่างเพียงพอเพื่อสามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโต โดยปุ๋ยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ ปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยเคมี(กองบรรณาธิการการเกษตร, 2559)

ปุ๋ยเคมี คือปุ๋ยที่มีแหล่งมาจากสารประกอบอนินทรีย์หรือสังเคราะห์ขึ้นจากกระบวนการเคมี(มุกดา สุขสวัสดิ์, 2547) ซึ่งพืชสามารถดูดซับนำไปใช้ได้โดยตรง แต่มีข้อเสียคือเมื่อใช้ในระยะเวลานานอาจทำให้มีการสะสมในดิน ทำให้ดินแข็ง ไถ ดูดซับ พรวนดินยาก

ปุ๋ยแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต(Magnesium Ammonium Phosphate, MAP) หรือสตูไวท์(Struvite) เป็นปุ๋ยเคมีชนิดหนึ่งมีลักษณะเป็นผลึกสีขาวแกมเหลือง ขนาดเล็กใหญ่แตกต่างกัน(กรมควบคุมมลพิษ, 2559) สามารถใช้เป็นแหล่งอาหารให้แก่พืชได้ ประกอบไปด้วยธาตุอาหารหลักได้แก่ ฟอสฟอรัส(Phosphorus, P) ไนโตรเจน(Nitrogen, N) และธาตุอาหารรองได้แก่ แมกนีเซียม(Magnesium, Mg) ซึ่งพืชสามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโต ช่วยในการสังเคราะห์แสง ช่วยให้พืชทนต่อสภาพอากาศที่ไม่เหมาะสมและทนต่อโรค เป็นต้น และเนื่องด้วยค่าความสามารถในการละลายที่น้อยมาก(ค่า $K_{sp} \approx 7.08 \times 10^{-4}$) ดังนั้นปุ๋ย MAP จึงจัดเป็นปุ๋ยชนิดละลายช้า สารอาหารถูกปล่อยให้แก่พืชในอัตราส่วนที่น้อย จึงสามารถลดปริมาณการใช้ปุ๋ยต่อพื้นที่ได้

ที่มา : http://www.wonvimon.co.th/home/factory/maketest.htm

รูปที่ 2-5 ผลึก MAP

การผลิตผลึก MAP จากน้ำเสียเป็นการควบคุมแมกนีเซียม แอมโมเนียและฟอสเฟต ให้เกิดการรวมตัวกันเป็นผลึกและตกตะกอนลงมาดังสมการ โดยควบคุมความเป็นกรดด่าง(pH) และอัตราส่วนของโมลต่างๆให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสม(กรมควบคุมมลพิษ, 2559)

$$Mg^{2+} + NH_4^{+} + PO_4^{3-} + 6H_2O \longrightarrow MgNH_4PO_4{\cdot}6H_2O + H^{+} \qquad 2\text{-}6$$

โดยการใช้ประโยชน์จากผลึก MAP ในรูปของปุ๋ย สามารถใช้เป็นปุ๋ยเดี่ยวๆให้กับพืชโดยตรงหรืออาจจะผสมกับปุ๋ยชนิดอื่นๆ เพื่อให้ได้สัดส่วนธาตุอาหารตามที่พืชต้องการ

2.1.11 ปุ๋ยแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต (Magnesium ammonium phosphate, MAP)

การกำจัดฟอสฟอรัสด้วยการตกตะกอน แมกนีเซียม แอมโมเนียม ฟอสเฟต (Magnesium ammonium phosphate, MAP) หรือ สตรูไวท์ (Struvite) เป็นวิธีการที่ นักวิจัยในต่างประเทศได้ ให้ความสนใจเป็นอย่างมากและได้ทำการศึกษากันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียที่สามารถนำสารอาหารของพืชกลับมาใช้ใหม่ (Nutrient recovery) ทั้งนี้ยังได้มีการจัดสร้างโรงงานและแบบจำลองต้นแบบสำหรับการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการนี้ ได้แก่ ประเทศญี่ปุ่น ประเทศสหรัฐอเมริกา ประเทศแคนาดา และ ประเทศอังกฤษ เป็นต้น

เทคโนโลยีที่กล่าวมานั้น ประเทศไทยก็ได้ให้ความสนใจและเริ่มทำการศึกษากันอย่างแพร่หลาย ซึ่งการตกตะกอน MAP เป็นการควบคุม แมกนีเซียม (Magnesium, Mg^{2+}) แอมโมเนีย (Ammonium, NH_4^+) และฟอสเฟต (Phosphate, PO_4^{3-}) ที่ละลายอยู่ ในน้ำเสียให้รวมตัวเกิดเป็นผลึกของแข็ง และตกตะกอนแยกออกมา(ดังสมการที่) โดยทำการปรับอัตราส่วนโมลของสาร ต่างๆ ค่าพีเอช หรือ ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ และปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องให้ มีสภาพที่เหมาะสมต่อการตกผลึก โดยผลึก MAP ที่แยกออกมาหรืออาจเรียกได้ว่าเป็นผลพลอยได้ที่ สร้างมูลค่าจากน้ำเสีย สามารถนำไปใช้เป็น ปุ๋ยละลายช้า (Slow release fertilizer) ในการทำการเกษตรเพื่อลดต้นทุนการนำเข้าปุ๋ยและลดปริมาณการนำเข้าปุ๋ยจากต่างประเทศ และยังสามารถกำจัดฟอสฟอรัสและแอมโมเนียมออกจากน้ำเสียได้อีกด้วย

สมบัติของ MAP เป็นเกลือละลายน้ำได้ช้า โดยมีค่าคงที่ของการละลายอยู่ที่ $2.47x10^{-13}$ เมื่อนำไปใช้เป็นปุ๋ยจะมีอัตราการละลายที่ต่ำ (slow-released fertilizer,SRF) พืชสามารถนำแร่ธาตุไปใช้ได้ยาวนาน นอกจากนี้ยังพบว่า MAP ละลายได้ดีในช่วงพีเอชที่น้อยกว่า 8.5 และมากกว่า 10.5 ซึ่งสภาพของดินมีระดับพีเอชที่ MAP สามารถละลายได้ดีสำหรับการตกผลึก MAP สามารถเกิดได้ในอัตราส่วนระหว่างแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟต (Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}) เท่ากับ 1:1:1 เมื่อถึงสภาวะอิ่มตัวของแมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสเฟต ที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย จะเกิดการรวมตัวเป็นผลึก MAP ขึ้น โดยระดับพีเอชที่ตกตะกอน MAP
ได้ดีอยู่ในช่วง 8.5-9 ถ้าพีเอชสูงถึง 10.5 จะเกิดการแข่งขันตกตะกอนในรูป $Mg_3(PO_4)_2$ มากกว่า ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถกำจัดแอมโมเนียมร่วมด้วย และ MAP ที่ได้จะละลายน้ำได้ยากขึ้น รวมทั้งแอมโมเนียมจะเปลี่ยนสภาพเป็นก๊าซแอมโมเนียได้ง่ายกว่าตกตะกอนเป็น MAP

$$Mg^{2+} + NH_4^+ + PO_4^{3-} + 6H_2O \longrightarrow MgNH_4PO_4{\cdot}6H_2O + H^+ \qquad 2\text{-}7$$

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการตกผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต(MAP)ในต่างประเทศศึกษากันอย่างกว้างขวาง เพราะเป็นวิธีที่นิยมนำสารอาหารในน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน นำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด หลายๆประเทศให้ความสนใจในการติดตั้งระบบการตกตะกอน MAP ประเทศญี่ปุ่นสร้างโรงบำบัดน้ำเสียชุมชน Unitika, Hiagari Sewage treatment plant ประเทศออสเตรเลียติดตั้งที่ oxley creek WWTP Brisbane ประเทศสหรัฐอเมริกาติดตั้งที่ Sacramento Regional WWTP และประเทศอิตาลีติดตั้งที่ Treviso WWTP (พัทธนันท์ นาถพินิจ,2559)

ในปี 2552, N.marti et al ศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของฟอสฟอรัส โดยกระบวนการตกตะกอนผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต (MAP) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ใช้กันในกระบวนการกำจัดหรือนำสารอาหารกลับมาใช้ใหม่ โดยประเมิณจากน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการป้อนน้ำเสียที่ต่าง 4 วิธี พบว่าฟอสฟอรัสมีประสิทธิภาพการตกตะกอน 80-90% และประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ 70-85% ผลึกตะกอนส่วนใหญ่เป็นผลึก MAP ตามด้วยผลึกแคมเซียมฟอตเฟส($Ca_3(PO_4)_2$) ในบางการทดลองจะตามด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต($CaCO_3$) การนำกลับมาใช้ใหม่ของฟอสฟอรัส เป็นสาเหตุของการกำจัดกากตะกอนและการตกผลึก เมื่อผลึกแคลเซียมฟอสเฟตมีจำนวนมากขึ้น จำนวนผลึก MAP จะน้อยลงเช่น ในน้ำกระด้างสูง เป็นต้น

แหล่งน้ำเสียที่นิยมนำมาใช้ในการตกตะกอนผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตมากที่สุดคือน้ำเสียจากฟาร์มสุกร งานวิจัยหลายงานวิจัยค้นพบว่าน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนจากฟาร์มสุกร มีสารอาหารตกค้างอยู่มาก ดังเช่นในปี 2553, Yong-Hui Song et al ศึกษาการกำจัดและการนำกลับมาใช้ใหม่ของฟอสฟอรัสและไนโตรเจนของน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรที่ผ่านการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน ด้วยวิธีการตกผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต (MAP) โดยการเปรียบเทียบระหว่างระบบบำบัดแบบเอสบีอาร์ (Sequencing Batch Reactor; SBR) และระบบบำบัดในเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่อง (continuous flow reactor) ในการเพิ่มค่าความเป็นกรด ด่าง (pH) นั้นจะใช้วิธี CO_2 stripping โดยกระบวนการตกผลึก MAP ปราศจากการเติมสารเคมีใดๆ เช่น alkali และ Hg^{2+} พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตในเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองสูงถึง 85% HRT เท่ากับ 6-15 ชั่วโมง และอุณหภูมิ 0-29.5 องศาเซลเซียส การนำกลับมาใช้ใหม่ของฟอสฟอรัสและไนโตรเจน ถูกวิเคราะห์โดยวิธี scanning electron microscope (SEM), X-ray diffraction (XRD) และวิธีทางเคมี MAP ที่ได้มีความบริสุทธิ์มากกว่า 90%

การศึกษากระบวนการตกตะกอนผลึก MAP เริ่มมีการศึกษาอย่างแพร่หลายมากขึ้น ต่อมาในปี 2554 Ying Hao Liu et al. ยังได้ศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสโดยการตกตะกอนผลึก MAP จากน้ำเสียสุกร พบว่าอัตราการเติมอากาศและอัตราส่วนโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟต ($Mg : PO_4^{3-}$) จะส่งผลต่อการตกตะกอนผลึก MAP ในน้ำเสียสุกร โดยกระบวนการจะมีปฏิกิริยาและการกำหนดขอบเขต นอกจากนี้ยังมีวิธีการทำให้บริสุทธิ์เพื่อที่จะนำ MAP บริสุทธิ์จากตะกอน ในการนำ MAP มาใช้ใหม่ได้รับการตรวจสอบ โดยกระบวนการที่มีปฏิกิริยาและการกำหนดขอบเขต เวลาปฏิกิริยา (RT) ขอบเขตปฏิกิริยาคือ 4 ชั่วโมง การเกิดผลึก MAP เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการเติมอากาศและมีปริมาตรประมาณ 0.73 ลิตรต่อลิตร·นาทีของการเติมอากาศ และเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (ฟอสฟอรัส<0.01) กับอัตราส่วนโมล Mg: PO_4^{3-} ที่เพิ่มขึ้นประมาณ 0.8 ถึง 1 ถูกพบว่าเป็นที่เหมาะสมสำหรับการเสริมสร้างการตกตะกอนผลึก MAP การนำตะกอนกลับมาใช้ใหม่มีฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) 19% และไนโตรเจนทั้งหมด (TN) 65% และ 67%

ของฟอสฟอรัสทั้งหมดและไนโตรเจนทั้งหมดในตะกอนที่ถูกนำกลับมาใช้ใหม่ภายใน MAP บริสุทธิ์โดยการละลายซ้ำและการตกผลึกซ้ำโดยจะใช้สารละลายที่เป็นกรดและด่างตามลำดับ ปริมาณโลหะหนักใน MAP จะถูกลดลงก่อนการทำให้บริสุทธิ์ การเกิด MAP ได้รับการวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง (SEM) และเครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ตามลำดับ

การศึกษานี้ไม่ได้เป็นที่สนใจในต่างประเทศเพียงอย่างเดียวในประเทศไทยขอก็ได้มีการศึกษาเรื่องนี้เช่นเดียวกันแต่ยังไม่เป็นที่แพร่หลายโดย รศ.ดร.สุธา ขาวเธียร ทำการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องการบำบัดธาตุอาหารของพืชที่ปนเปื้อนในน้ำเสียและการนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ด้วยกระบวนการทางเคมีในปี 2555 โครงงานวิจัยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการกำจัดธาตุอาหารในน้ำเสียด้วยการตกตะกอนผลึกทางเคมีในระดับห้องปฏิบัติการ และการศึกษาการผลิตธาตุอาหารที่มีประโยชน์ต่อพืชโดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบชนิดตกตะกอนเคมี โดยน้ำเสียที่นำมาทดลองคือน้ำเสียจากฟาร์มสุกรพบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตสารประกอบ MAP ได้แก่ อัตราส่วนโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟต ($Mg:PO_4$) เท่ากับ 1:1 ที่สภาวะ pH 8-9 ที่อุณหภูมิห้อง ใช้เวลา 48 ชั่วโมง โดยสามารถตกตะกอนผลึก MAP ได้ประมาณ 0.75-0.78 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร การผลิตปุ๋ยธาตุอาหารจากน้ำหลังผ่านระบบบำบัดด้วยอุปกรณ์ต้นแบบชนิดตกตะกอนเคมี สามารถผลิตปุ๋ยได้ ประมาณ 3-6 กิโลกรัมต่อปริมาตรน้ำ 2,000 ลิตร และผลการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุอาหารที่มีประโยชน์ต่อพืช พบว่าตะกอน 100 กรัม (น้ำหนักแห้ง) มีปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด(Phosphorus, Total P) เท่ากับ 14.24 กรัม มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen, Total N) เท่ากับ 1.47 กรัมและมีปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด (Potassium, Total K) เท่ากับ 0.31 กรัม หรืออยู่ในรูปของปุ๋ยธาตุอาหารหลัก (N-P-K) เท่ากับ 1.47-14.24-0.31 ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยละลายช้า (Slow-release fertilizer) หรือนำไปผลิตเป็นปุ๋ยผสม (Mixed fertilizer) ทดแทนการนำเข้าปุ๋ยเคมีได้

นอกจากน้ำเสียจากการฟาร์มสุกรแล้ว แหล่งน้ำเสียที่น่าสนใจอีกแหล่งคือน้ำเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม คาดว่าน้ำเสียเหล่านี้เมื่อผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะยังมีสารอาหารตกค้างอยู่ ดังเช่นงานวิจัยของ Shahrakbah Yacob, (2548) ได้ทำการศึกษาน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (POME) จากกระบวนการแยกน้ำมัน โดยเปรียบเทียบน้ำทิ้งจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนในบ่อหมักขนาด 500 ลูกบาศก์เมตร กับน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน พบว่าระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนมีประสิทธิภาพการกำจัด COD สูงถึง 97% และมีอัตราการกรดระเหยต่อความเป็นด่างที่ 0.1-0.3 ค่า hydraulic retention time (HRT) 17 วัน และใช้เวลาทั้งกระบวนการไม่ถึง 3 เดือน ที่เวลาเริ่มต้นจะมีอัตราการผลิตก๊าซชีวมวลสูง แต่จะลดลงในระหว่างอัตราการป้อนสารออแกนิค (OLR) เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีของน้ำทิ้งโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม(POME) อย่างทันทีทันใดส่งผลต่อความเสถียรของระบบ

น้ำเสียที่นำมาศึกษากระบวนการตกตะกอนผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตไม่ได้มีเพียงน้ำเสียจากฟาร์มสุกร โรงงานแป้งมันสำปะหลัง โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเท่านั้นแต่ยังมีน้ำเสียจากฟาร์มปศุสัตว์อื่นๆและโรงงานอุตสาหกรรมทางเกษตรอื่นๆอย่างเช่นในปี2559 พัทธนันท์ นาถพินิจ และคณะ ได้ศึกษาความเป็นไปได้ ในการตกตะกอนเกลือแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตจากน้ำเสียยางพาราที่ผ่านการผลิตก๊าซชีวภาพแล้วโดยในน้ำเสียมีปริมาณเฉลี่ยของแมกนีเซียมไอออนแอมโมเนียมไอออน ฟอสเฟตไอออน ของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด และระดับพีเอชที่ 100, 125, 217, 2,398 มิลลิกรัมต่อลิตรและ 7.25 ตามลำดับ โดยระดับพีเอชที่ใช้ในการตกตะกอนจะอยู่ในช่วง 8.5-9.5 จากการทดลองพบว่าน้ำเสียยางพาราที่ผ่านการผลิตก๊าซชีวภาพแล้วสามารถนำมาตกตะกอน MAP ได้โดยไม่จำเป็นต้องมีการบำบัดขั้นต้นด้วยการปรับสภาพให้เป็นกรด โดยอัตราส่วนโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตในการตกตะกอนอยู่ที่ 1.3:1:1.3 และสามารถกำจัดแมกนีเซียมไอออน แอมโมเนียมไอออน และฟอสเฟตไอออนได้ที่ 47, 22 และ 86 % ตามลำดับ ซึ่งได้ตะกอนเกลือแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตที่มีสีขาวนวล ประมาณ 322 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร และเกลือ MAP ที่ได้มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (total N) และฟอสฟอรัส (P) เป็น 5.1 และ 32.5 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับ มีอัตราส่วนไนโตรเจนทั้งหมดต่อฟอสฟอริกแอซิค(TN:P_2O_5) เป็น 1:6.4 ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยสำหรับพืชดอกได้ และเกลือ MAP มีความสามารถในการละลายเป็น 39.3 มิลลิกรัมต่อลิตร

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่น่าสนใจอื่นๆอีกเช่น Wendong Tao et al (2558) ศึกษาการตกตะกอนผลึก MAP จากฟาร์มวัวนม โดยพบว่าน้ำเสียจากฟาร์มวัวนมหลังจากผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะมีแอมโมเนียม ฟอสเฟต และแมกนีเซียมจำนวนมากเหมาะสำหรับการตกตะกอนแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต และปัญหาหลักๆที่พบคือ ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออน(Ca^{2+})จะรบกวนการตกตะกอนผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตและเป็นผลต่อความบริสุทธิ์ อิทธิพลของของแข็งแขวนลอยจะเป็นผลให้กระบวนการตกตะกอนแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตลดลง จึงควรแยกของแข็งแขวนลอยออกก่อนการตกผลึกโดยสามารถใช้วิธีการแยกทางกล เช่น การเหวี่ยง การกรองเป็นต้น อีกหนึ่งปัจจัยที่เป็นปัญหา คือ ความสามารถในการละลายและความแข็งแรงของไอออน โดยเฉพาะอย่างยิ่งความแรงของไอออนในน้ำเสียมาก ค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยา (K) ยิ่งน้อยลง สามารถทำให้เกิดการรวมตัวของสารอื่นๆที่ไม่ใช่ส่วนประกอบ MAP ผลึก MAP ที่ได้จึงไม่บริสุทธิ์และยังทำให้การเติบโตของผลึก MAP ลดลงอีกด้วย และยังพบว่าการตกตะกอนจะได้ผลึกที่บริสุทธิ์เมื่อน้ำเสียถูกกรองไอออนที่แข็งแรงกว่า 0.145 โมลาร์ออก ความสามารถในการละลายควรจะน้อยเพื่อไม่ให้เกิดการแทรกตัวของไอออนอื่น ความเป็นกรดด่าง (pH) ที่เหมาะสม คือ 8.5-9.3 ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัส ผ่านการตกตะกอนผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนระหว่างแมกนีเซียมไอออนต่อฟอสเฟต (Mg^{2+}:PO_4^{3-}) มีค่าเพิ่มขึ้น 1 – 10

และในสภาวะที่เป็นด่างสูง คาร์บอเนตจะแข่งกับฟอสเฟตในการเจริญเติบโตของผลึก ทำให้ได้ผลึกที่ไม่บริสุทธิ์

เนื่องจากแนวโน้มในอนาคตการขาดแคลนอาหารเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรมนุษย์จะเป็นปัญหาในอนาคต ทำให้ความต้องการอาหารเพิ่มมากขึ้น และแน่นอนความต้องการปุ๋ยเพื่อจะนำไปผลิตวัตถุดิบ สินค้าทางการเกษตรต้องมีมากขึ้น แต่ในขณะเดียวกันมีการคาดกันว่าแหล่งสำรองปุ๋ยฟอสเฟตนั้นจะหมดไปภายใน 50-100 ปี ฉะนั้นจึงมีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการดึงธาตุอาหารเหล่านี้ออกมาจากน้ำเสีย โดยการผลิตเป็นปุ๋ยสตรูไวท์ แหล่งน้ำเสียโรงงานเกษตรอุตาหกรรม และฟาร์มปศุสัตว์มีศักยภาพมากเพราะมีสารอาหารครบ อย่างไรก็ตามงานวิจัยประเภทนี้ยังวไม่ได้รับความสนใจมากนัก

บทที่ 3

อุปกรณ์ สารเคมี และขั้นตอนการทดลอง

เมื่อทำการศึกษาข้อมูลทางทุติยภูมิโดยการเก็บรวบรวมข้อมูลจากวารสารวิชาการ งานวิจัยต่างๆ พบว่าการตกผลึก MAP ต้องอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม มีปัจจัยหลายอย่างที่ส่งผลกระทบต่อการตกผลึก MAP เช่น ค่าความเป็นกรดด่าง(pH) ในการตกผลึก MAP ของน้ำเสียจากยางพาราพบว่ามีค่า 7-9 (สุธา ขาวเธียร, 2555) อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างแมกนีเซียมต่อฟอสเฟต(Mg^{2+}: PO_4^{3-}) 0.8 ถึง 1 ซึ่งเหมาะกับการตกผลึก MAP น้ำเสียจากฟาร์มสุกร(Ying Hao Liu et al. 2554) สารปนเปื้อนอื่นๆเช่น ไขมัน เป็นต้น จากนั้นจึงทำการเก็บข้อมูลปฐมภูมิ โดยการสำรวจโรงงาน ทำการขอข้อมูลจากโรงงาน การศึกษาในตอนที่ 1 เป็นการเก็บตัวอย่างน้ำและตะกอนจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มและฟาร์มสุกร มาวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำเสีย เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของตัวอย่างน้ำแต่ละแหล่ง การทดลองที่ 1 เป็นการศึกษาผลกระทบของค่าความเป็นกรดด่าง(pH)ที่เหมาะสมในการตกผลึก MAP โดยเลือกน้ำเสียที่ผ่านการศึกษาในตอนที่ 1 ที่มีปริมาณสารอาหารมากที่สุด และความเป็นไปได้ในการตกผลึก MAP นำมาตกผลึก MAP ที่ค่า pH ที่ต่างกัน แล้วทำการเปรียบเทียบปริมาณและลักษณะผลึก MAP ที่ได้ การทดลองที่ 2 เป็นการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนระหว่างแมกนีเซียมต่อฟอสเฟต(Mg^{2+}: PO_4^{3-}) โดยเปรียบเทียบปริมาณลักษณะผลึก MAP ที่ได้จากอัตราส่วนที่ต่างกัน โดยทั้ง 2 การทดลองจะทำการวิเคราะห์น้ำเสียหลังจากตกตะกอน MAP เพื่อวัดสารอาหารที่เหลืออยู่ในน้ำเสียต่อไป

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 สารเคมี

1. Magnesium chloride ($MgCl_2 \cdot H_2O$)
2. Ammonium di-hydrogen phosphate ($NH_4H_2PO_4$)
3. Sodium hydroxide (NaOH)
4. Hydrochloric acid (HCl)

3.1.2 วัสดุอุปกรณ์

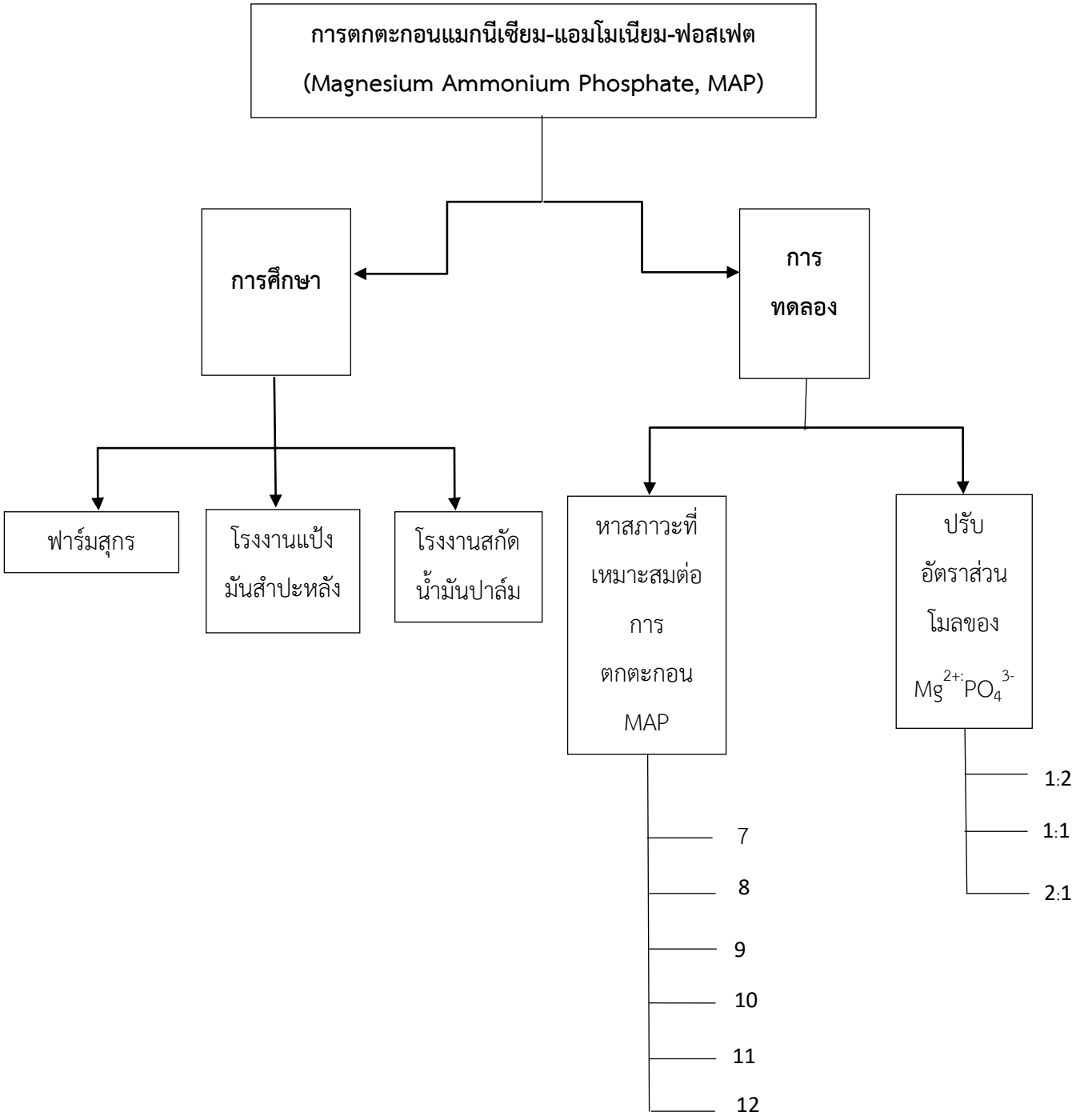
1. เครื่องวัดความเป็นกรดและด่าง (pH meter)
2. Hanna Instruments HI 83224 Water Test Spectrophotomete

3. เครื่องกวนสารผสม (Magnetic stirrer)

4. กระดาษกรอง Wire Mesh ขนาด 25 Micron

5. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง

6. อุปกรณ์เครื่องแก้วอื่นๆ



การศึกษาที่ 1 เปรียบเทียบศักยภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ของสารอาหารในน้ำเสียจากทั้งสามแหล่ง

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 ขั้นตอนการศึกษาและการวิเคราะห์เบื้องต้น

โดยเริ่มที่การศึกษาข้อมูลทุติยภูมิเทคโนโลยีการผลิต MAP จากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแบบไร้อากาศ โดยการเก็บรวบรวมข้อมูลจากวารสารวิชาการต่างๆ รวมถึงหาข้อมูลประสิทธิภาพของเทคโนโลยีการผลิตปุ๋ย MAP ค่าใช้จ่ายในการลงทุน ค่าใช้จ่ายในการดำเนินระบบ ข้อจำกัดต่างๆ ในด้านการปฏิบัติ เช่น การใช้สารเคมี การเติมอากาศ เป็นต้น การรวบรวมข้อมูลทางทฤษฎีรวมไปถึงข้อมูลกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรม และฟาร์ม คัดเลือกโรงงานและฟาร์มตัวอย่าง โดยเฉพาะอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง 2 โรงงาน น้ำมันปาล์ม และฟาร์มสุกร เป็นจำนวนทั้งหมด 4 แหล่ง

3.2.2 การสำรวจโรงงานและเก็บตัวอย่างวิเคราะห์น้ำเสีย

ลงภาคสนามตามโรงงานตัวอย่างที่คัดเลือก ทำการขอข้อมูลจากโรงงานแบบปฐมภูมิ รวมถึงเก็บตัวอย่างน้ำและตะกอนจากระบบ ซึ่งตัวอย่างน้ำที่ได้จากการสำรวจจะเก็บไว้ในตู้แช่เย็นที่รักษาอุณหภูมิให้ต่ำกว่า 4 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ตามวิธี Standard Methods for the Examination of water and wastewater ซึ่งการตรวจจะมีทั้งส่งตรวจที่บริษัท แซน.อี.68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียรส์ จำกัดซึ่งเป็นองค์กรที่ปรึกษาด้านสิ่งแวดล้อมและทำการตรวจวัดเอง เมื่อได้ข้อมูลแล้วจะนำไปเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตกผลึก MAP

นำน้ำเสียมาทำการวิเคราะห์สารอาหารทั้งหมดที่อยู่ในน้ำเสียจากทั้ง 4 โรงงาน โรงงานละ 3 ส่วน คือ น้ำที่ออกจากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ(Biogas Outlet) น้ำจากบ่อพักน้ำเสีย(post treatment) และจากกากตะกอน(Sludge) เปรียบเทียบสารตั้งต้นการตกตะกอน MAP (แมกนีเซียมไอออน(Mg^{2+}), แอมโมเนียมไอออน(NH_4^+) และฟอสเฟตไอออน(PO_4^{3-}) ทำการศึกษาผลกระทบของสารอาหารอื่นๆที่ไม่ใช่สารตั้งต้นในการตกตะกอน MAP วิเคราะห์ปัจจัยทางทำเลที่ตั้ง และความเหมาะสม ศึกษาความเป็นไปได้ในการติดตั้งระบบกวนผสม และสรุปผลน้ำเสียที่เหมาสมในการนำการตกตะกอน MAP

การทดลองที่ 1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลึก MAP

1.1 เก็บตัวอย่างน้ำเสีย

เมื่อทำการวิเคราะห์น้ำเสีย และทราบแหล่งน้ำเสียที่มีความเหมาะสมแล้วทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานที่เลือก 10 ลิตร โดยใช้ถังแกลลอนเก็บน้ำเสียไว้ในตู้แช่เย็นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 4 องศาเซลเซียส

1.2 ตรวจสอบสภาวะน้ำเสีย

ทำการวิเคราะห์สารอาหารในน้ำเสียวัดปริมาณ Mg^{2+}, NH_4^+, PO_4^{3-}, Ca^{2+} ด้วยเครื่อง Hanna Instruments HI 83224 Water Test Spectrophotomete และวัดพีเอชด้วยเครื่อง pH Meter

1.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการตกตะกอน MAP

นำน้ำตัวอย่างมาแบ่งออกเป็น 6 บีกเกอร์ บีกเกอร์ละ 500 มิลลิลิตร จากนั้นปรับค่าความเป็นด่าง (pH) เท่ากับ 7(ไม่ปรับค่า) 8, 9, 10, 11 และ 12 ตามลำดับ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ทั้งนี้จะควบคุมสภาวะอื่นๆในการทดลองให้คงที่ และนำน้ำตัวอย่างไปทดสอบสภาวะที่เกิดตะกอนผลึก MAP โดยการกวนเร็วที่ 60 รอบต่อนาทีและกวนช้าที่ 30 รอบต่อนาที ด้วยเครื่องกวนสารผสม (Magnetic stirrer) ใช้เวลาอย่างละ 15 นาที หลังจากนั้นตั้งทิ้งให้เกิดการตกตะกอนเป็นเวลา 48 ชั่วโมง

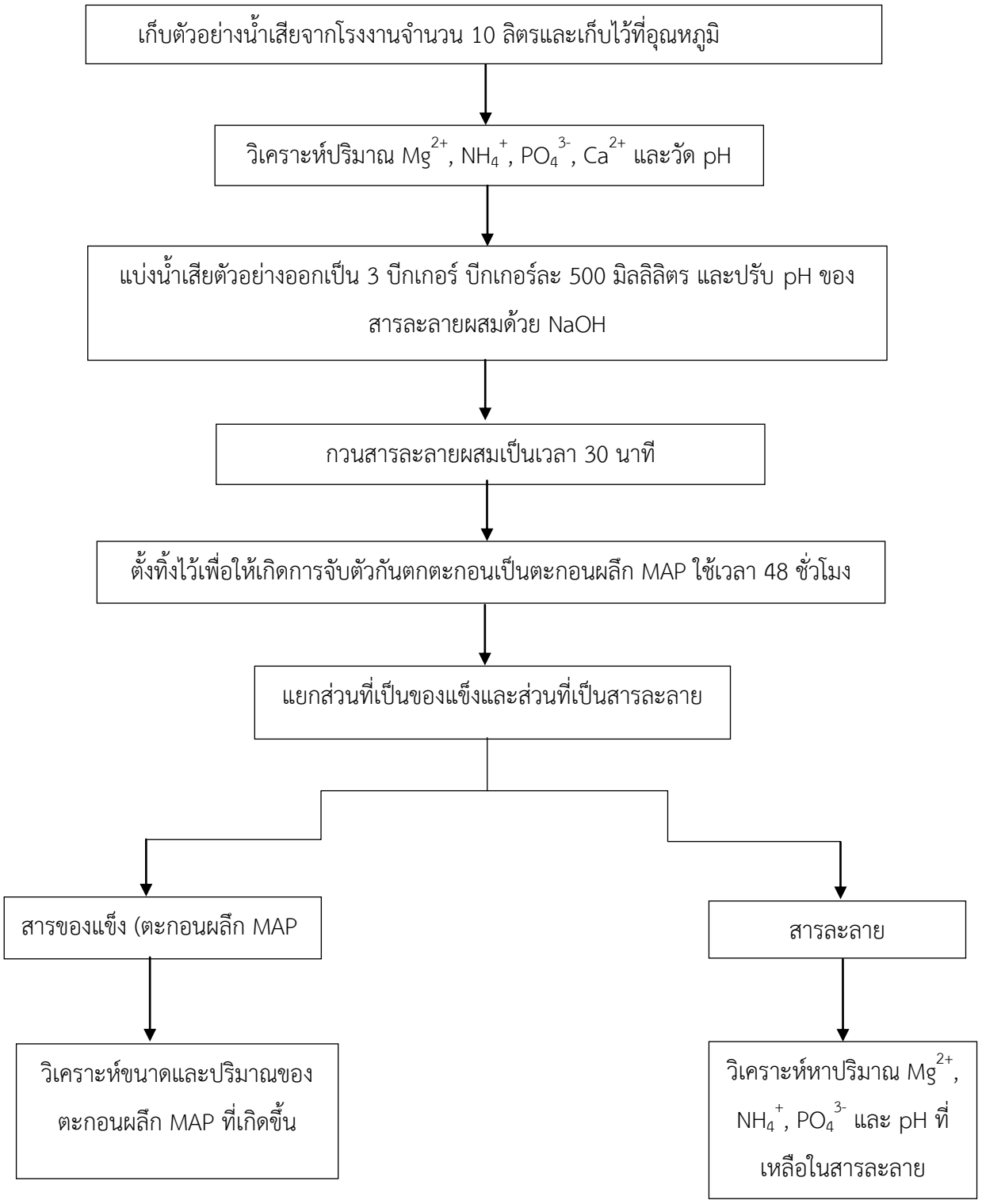
1.4 ตรวจสอบสภาวะที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนแมกนีเซียม-แอมโมเนียม-ฟอสเฟต

นำน้ำตัวอย่าง มาแยกระหว่างของแข็งและของเหลว ทำการแยกโดยใช้ชุดกรองแยกสาร จากนั้นนำส่วนของของแข็งมาทำให้แห้งแล้วทำการวิเคราะห์ขนาดและปริมาณของตะกอนผลึก MAP ที่เกิดขึ้น ส่วนสารละลายก็จะนำไปวิเคราะห์หาปริมาณ NH_4^+, PO_4^{3-}, Mg^{2+}, Ca^{2+} และ pH ที่เหลือในสารละลาย

<u>แผนผังการทดลอง</u>

การทดลองที่ 1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการตกผลึก MAP

การทดลองที่ 1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการตกผลึก MAP



ปรับ pH เท่ากับ 7(ไม่ปรับค่า pH), 8, 9, 10, 11 และ 12 ตามลำดับ และทำการทดลองตามแผนผัง

การทดลองที่ 2 ศึกษาอัตราส่วน Mg^{2+} : PO_4^{3-} ที่เหมาะสมต่อการตกผลึก MAP

2.1 เก็บตัวอย่างน้ำเสีย

ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานที่เลือกประมาณ 10 ลิตร เก็บน้ำเสียไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 4 องศาเซลเซียส

2.2 ตรวจสอบสภาวะน้ำเสีย

ทำการวิเคราะห์สารอาหารในน้ำเสียวัดปริมาณ Mg^{2+}, NH_4^+, PO_4^{3-} และ Ca^{2+} ด้วยเครื่อง spectrophotometer และวัดพีเอชด้วยเครื่อง pH Meter

2.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการตกตะกอน MAP

นำน้ำตัวอย่างมาแบ่งออกเป็น 3 บีกเกอร์ บีกเกอร์ละ 500 มิลลิลิตร จากนั้นปรับค่าความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออน(Mg^{2+})ต่อฟอสเฟตไอออน(PO_4^{3-})เท่ากับ 1:2, 1:1, 2:1 ด้วย $MgCl_2{\cdot}H_2O$, $NH_4H_2PO_4$ และปรับค่าความเป็นด่าง(pH) ที่ทำให้เกิดการตกตะกอนที่ดีที่สุด(จากการทดลองที่ 1) โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ทั้งนี้จะควบคุมสภาวะอื่นๆในการทดลองให้คงที่ และนำน้ำตัวอย่างไปทดสอบสภาวะที่เกิดตะกอนผลึก MAP โดยการกวนเร็วที่ 60 รอบต่อนาทีและกวนช้าที่ 30 รอบต่อนาที ด้วยเครื่องกวนสารผสม (Magnetic stirrer) ใช้เวลาอย่างละ 15 นาที หลังจากนั้นตั้งทิ้งให้เกิดการตกตะกอนเป็นเวลา 48 ชั่วโมง

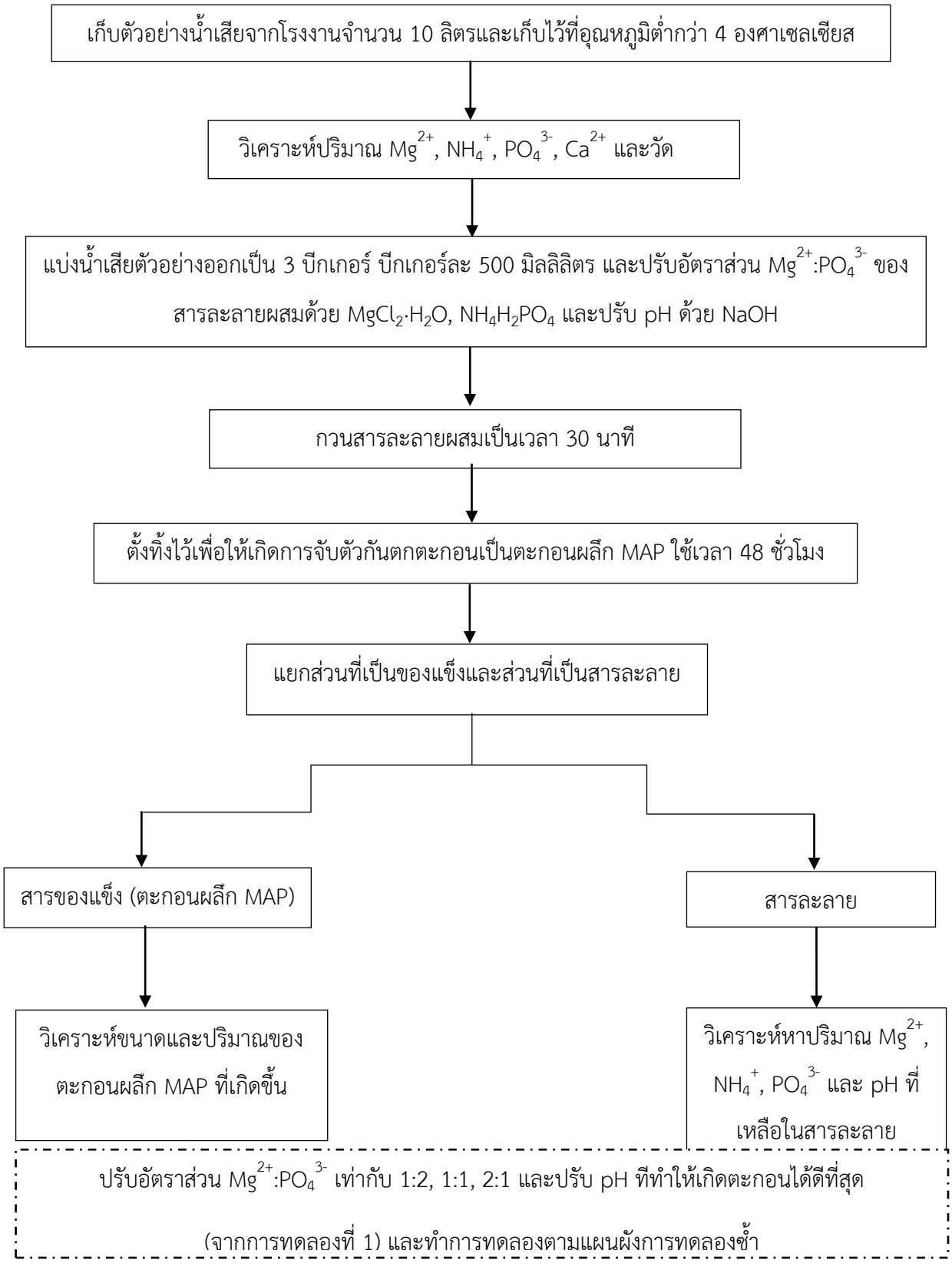
2.4 ตรวจสอบสภาวะที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนแมกนีเซียม-แอมโมเนียม-ฟอสเฟต

นำน้ำตัวอย่าง มาแยกระหว่างของแข็งและของเหลว ทำการแยกโดยใช้ชุดกรองแยกสาร จากนั้นนำส่วนของของแข็งมาทำให้แห้งแล้วทำการวิเคราะห์ขนาดและปริมาณของตะกอนผลึก MAP ที่เกิดขึ้น ส่วนสารละลายก็จะนำไปวิเคราะห์หาปริมาณ NH_4^+, PO_4^{3-}, Mg^{2+}, Ca^{2+} และ pH ที่เหลือในสารละลาย

<u>แผนผังการทดลอง</u>

การทดลองที่ 2 ศึกษาอัตราส่วน Mg^{2+} : PO_4^{3-} ที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนแมกนีเซียม-แอมโมเนียม-ฟอสเฟต (Magnesium Ammonium Phosphate, MAP)

การทดลองที่ 2 ศึกษาอัตราส่วน Mg^{2+} : PO_4^{3-} ที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนแมกนีเซียม-แอมโมเนียม-ฟอสเฟต (Magnesium Ammonium Phosphate, MAP)



รูปที่ 3-1 นำน้ำเสียมาจากบ่อบำบัดขั้นหลังของโรงงาน

ก่อนทำการทดลองแบบ Batch ได้นำน้ำมากรองผ่านผ้าขาวบางเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่มีขนาดใหญ่ เช่น กิ่งใบไม้ สาหร่าย ก่อนการตกตะกอนก่อนนำไปวัดค่า ฟอสเฟต แอมโมเนี่ยม แคลเซียมและแมกนีเซียม ของน้ำเสียเริ่มต้น

การทดลองแบบต่อเนื่องทำโดยใช้ชุดการทดลองที่ประกอบด้วย ชุดการทดลองกรวยแบบหงาย ขนาด ๒๐ ลิตร สองชุด เพื่อทำการทดลองเปรียบเทียบความสามารถในการตกตะกอนปุ๋ยสตรูไวท์ แบบต่อเนื่อง โดยกรวยทดลองหนึ่งจะเป็นกรวยทดลองบังคับที่การเดินระบบมาตรฐาน และอีกกรวยการ ทดลองจะทำการเปลี่ยนค่าการเดินระบบ เช่น ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา พีเอชของน้ำเสีย การเติมอากาศ และการเดินแบบสองขั้นตอน คือ การนำน้ำจากกรวยแรกเข้าไปสู่กรวยที่สอง เพื่อเพิ่มระยะเวลาในการทำ ปฏิกริยา เป็นต้น

รูปที่ 3-2 การทดลองการผลิตปุ๋ยสตรธไวท์ด้วยระบบต่อเนื่องในห้องปฏิบัติการ

การทดลองเริ่มโดย นำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมาใส่ในถังขนาด 50 ลิตร และปั๊มเข้าสู่ชุดทดลองแบบกรวยอย่างต่อเนื่องในอัตราที่เท่ากันที่ 200 มล.ต่อนาที ด้วยปั๊มรีด (BTM 100 (Fluidxxx, China) สำหรับการทดลองปรับค่าพีเอชของน้ำทำโดยการ ปั๊มสารละลาย 5% NaOH เข้าสู่น้ำในอัตราคงที่ที่ 1 มล.ต่อนาที หรือที่อัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อทำให้ได้น้ำที่มีคุณภาพตามที่ต้องการ ส่วนการทดลองเพื่อเปรียบเทียบระหว่างการเติมอากาศทำโดยใช้ aquatic air pump (Heiem, Germany) และหินเติมอากาศ การเปรียบเทียบระยะเวลาในการทำปฏิกริยาในกรวยการทดลองทำโดยปรับรอบการปั๊มที่ระยะเวลา ๒ และ ๘ ชั่วโมง ตามลำดับ น้ำเสียเข้าสู่กรวยจากด้านล่างสู่ด้านบน ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางกรวยเพิ่มขึ้นสม่ำเสมอจาก ๕ ซม สู่ ๓๐ ซม ทำให้อัตราการไหลของน้ำส่วนบนต่ำมีความเร็วที่ < 0.6 ม.ต่อนาที เพื่อให้เม็ดตะกอนปุ๋ยสตรูไวท์สามารถตกตะกอนได้

การทดลองระดับห้องปฏิบัติการทำโดยระบบ flow-through ด้วยกระบอกทดลองแก้วขนาดเล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 ซม ความยาว 25 ซม ทำการเก็บน้ำตัวอย่างน้ำเสีย 180 L จากโรงงาน ให้เวลาตกตะกอนก่อนนำมาเพื่อทดลอง การตกผลึกสตูรไวท์ในระดับห้องปฏิบัติการ น้ำถูกปั๊มเข้าสู่หลอดทดลอง 4 หลอดที่ทำงานคู่ชนานกันผ่านปั๊ม peristaltic โดยหลอดทดลองมีการออกแบบให้สามารถป้อนสารละลาย NaOH และ $MgCl_2$ เพื่อปรับค่าโมล และพีเอช เพิ่มธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับการตกตะกอนจากที่ได้จากการจำลองทางเคมีด้วยซอฟแวร์ โดยการปั๊มฉีกเข้าสู่สายยางสู่น้ำที่ไหลสู่หลอดปฏิกิริยา เติมอากาศเข้าสู่หลอดทดลองสม่ำเสมอเพื่อลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากน้ำ และเพิ่มการกวนในการทำปฏิกิริยา ทำการวัดปริมาณการเกิดตะกอนในหลอดทดลอง และเก็บตัวอย่างน้ำหลังการทดลองด้วย Autosampler เพื่อนำไปวิเคราะห์หาธาตุอาหารที่ลดลง ทำการคำนวณสมดุลมวล นอกจากนั้นแล้วจะทำการทดลองที่สภาวะตั้งต้นแตกต่างกันโดยการเปลี่ยนแปลงค่า พีเอช 7-10 อัตราส่วนโมลของธาตุอาหารต่าง ๆ กัน อัตราการเติมอากาศ 0 - 50 มล ต่อนาทีและระยะเวลาในการตกผลึก 2 – 24 ชั่วโมง เป็นต้น

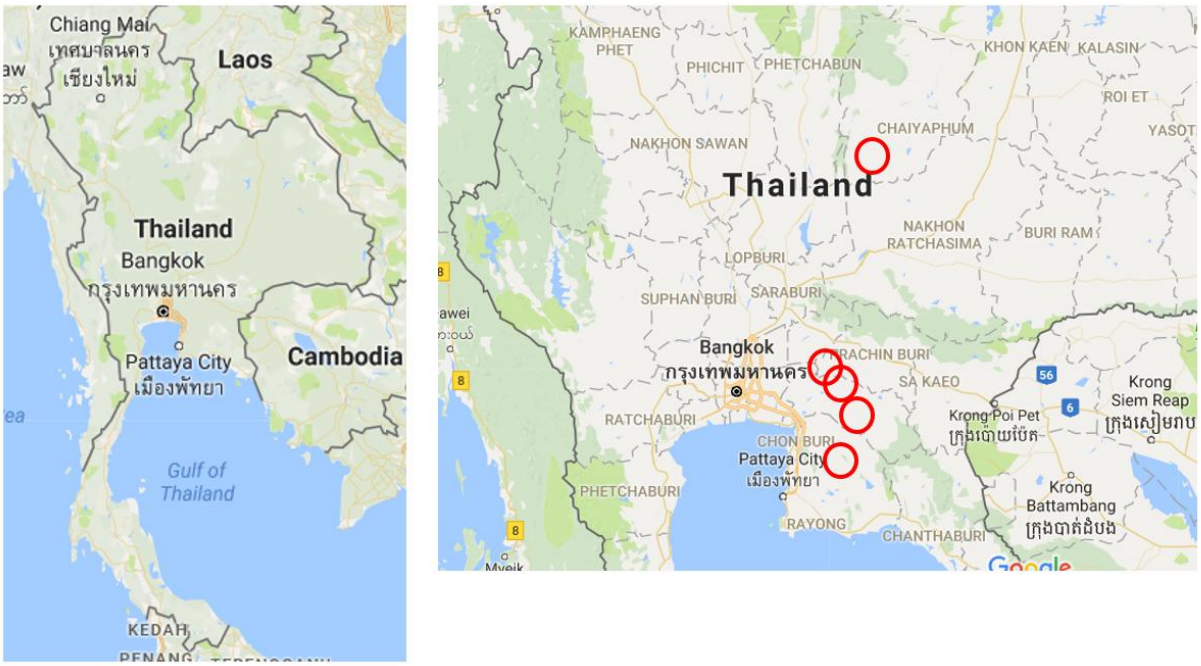
ผลการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการนำไปประเมินเพื่อ ให้ทราบว่าน้ำเสียจากส่วนใหญ่ของระบบมีปริมาณธาตุอาหารและอัตราการไหลที่เหมาะสม มีความเป็นไปได้ทางการลงทุนและการเทคนิคการเดินระบบ และเพื่อออกแบบการทดลองระดับภาคสนามให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

4.1 ผลการสำรวจโรงงาน

ได้ทำการดำเนินการสำรวจโรงงานและฟาร์มปศุสัตว์ในจังหวัดชลบุรีและชัยภูมิรวมทั้งหมด 6 แห่ง โดยแบ่งเป็น น้ำเสีย 3 ประเภทคือ น้ำเสียจากโรงงานแป้งมัน น้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม และน้ำเสียจากฟาร์มสุกร



รูปที่ 4-1 แสดงการสำรวจภาคสนามของโรงแป้งมันสำปะหลัง

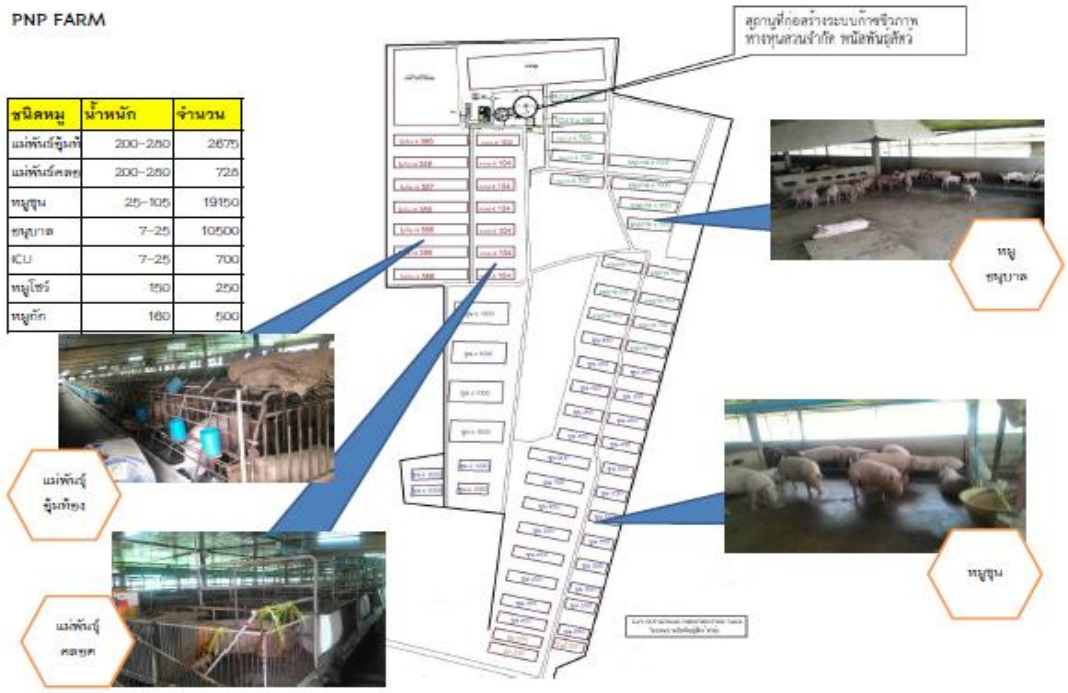
จากการสำรวจโรงงานอุตสาหกรรมและฟาร์มปศุสัตว์พบว่า น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการต่างๆ นั้น ได้ใช้เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ และเป็นแบบบ่อเปิดเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำขั้นหลัง โดยก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากบ่อบำบัดไร้อากาศนั้นจะนำมาผลิตกระแสไฟฟ้า หรือใช้ทดแทนเชื้อเพลิงต่างๆ ภายในสถานประกอบการ อย่างไรก็ตาม พบว่าน้ำเสียที่ออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพนั้นไม่มีการนำไปสร้างมูลค่าอย่างเป็นรูปมธรรม โดยสถานประกอบการทั้งหมดที่ได้เข้าทำการสำรวจจะปล่อยน้ำลงในบ่อเปิด เพื่อการบำบัดขั้นหลัง และเกษตรกรรอบๆ โรงงานนำไปใช้ในการเกษตรกรรม โดยรวมถือว่ายังไม่ได้ใช้ประโยชน์จากสารอาหารที่มีอยู่ในน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 4-1 แสดงรายชื่อสถานประกอบการที่ได้ทำการสำรวจโรงงานและเก็บตัวอย่างน้ำ

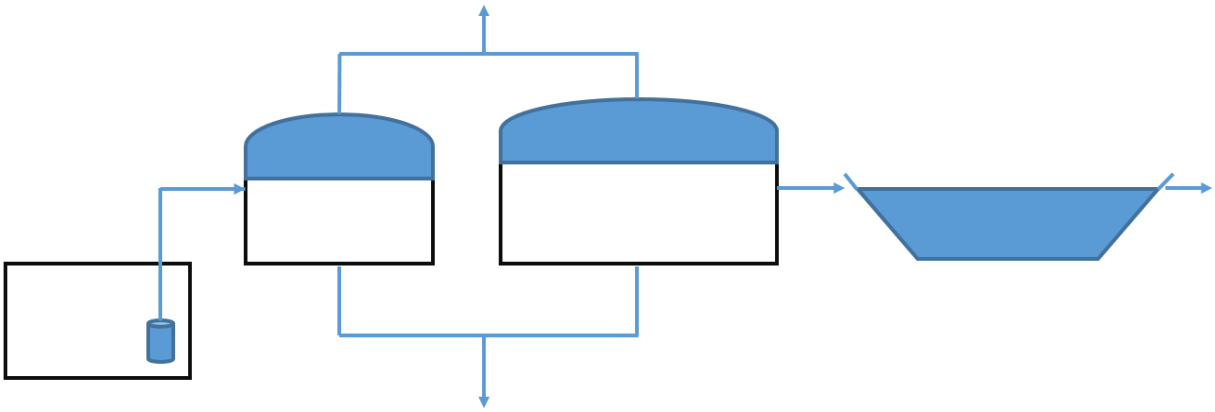
สถานประกอบการ	**กำลังการผลิต (ตันแป้ง หรือ ตันทะลายปาล์มต่อวัน)**	**เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสีย**	**ปริมาณน้ำเสีย (m^3/d)**	**ปริมาณก๊าซชีวภาพ (m^3/d)**	**วิธีการการบำบัดน้ำขั้นหลัง/ขนาด**	**การนำน้ำบำบัดแล้วมาใช้ใหม่**
สหมิตรแป้งมัน	120	Cover lagoon	1200	6,000	บ่อเปิด	รดสวนเกษตร
แป้งมันแสงเพชร	200	Cover lagoon	3000	15,000	บ่อเปิด	รดสวนเกษตร
อิสเทอร์นปาล์ม	1000	Cover lagoon/ กวนสมบูรณ์	300,000 ต่อปี	5.5-8 ล้านต่อปี	บ่อเปิด	รดสวนเกษตร
สุขสมบูรณ์น้ำมันปาล์ม	300	Cover lagoon			บ่อเปิด	รดสวนเกษตร
จักรกฤษฟาร์ม	แม่พันธ์ 3000 พ่อพันธ์ 100 อนุบาล 6-7000	Cover lagoon	ไม่มีข้อมูล	ไม่มีข้อมูลผลิต	บ่อเปิด	รดสวนเกษตร
พนัสฟาร์มสุกร	แม่พันธ์ 2675 พ่อพันธ์ 725 อนุบาล 19150	CSTR + Cover lagoon	800	1430	บ่อเปิด	รดสวนเกษตร

รูปที่ 4-2 แสดงการสำรวจภาคสนามของโรงงานแป้งมันสำปะหลัง

รูปที่ 4-3 แสดงการสำรวจภาคสนามของโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม และการเก็บน้ำตัวอย่าง



รูปที่ 4-4 แสดงฟาร์มสุกร (ข้อมูลจากบริษัท ไม่ได้รับอนุญาตให้เข้าทำการสำรวจเนื่องจากป้องกันโรคติดต่อจากภายนอกสู่ปศุสัตว์ได้)



รูปที่ 4-5 แสดงรูปแบบระบบบำบัดน้ำเสียของสถานประกอบการต่างๆ ซึ่งประกอบไปด้วย ถังรวบรวมน้ำ ระบบ บำบัดน้ำแบบไร้อากาศ ระบบดึงกากตะกอน และระบบบำบัดน้ำเสียขั้นหลัง

เมื่อทำการสำรวจโรงงาน ลงภาคสนามสอบถามผู้ประกอบการเพื่อทำการเก็บข้อมูลและเก็บตัวอย่างน้ำจากโรงงาน โรงงานละสามแหล่งคือน้ำเสียที่ออกจากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ (Biogas Outlet) น้ำบ่อสุดท้าย (Post Treatment) และกากตะกอน (Sludge) ซึ่งโรงงานที่ได้เข้าไปทำการสำรวจประกอบไปด้วยโรงงานแป้งมันสำปะหลังที่ตั้งอยู่ในจังหวัดชลบุรีและชัยภูมิ (ก. และ ข. ตามลำดับ) โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (ค.) และฟาร์มสุกร (ง.) ซึ่งตั้งอยู่ในจังหวัดชลบุรีเช่นเดียวกัน ดังนั้นน้ำที่นำมาใช้พิจารณาในการทดลองในระดับ Laboratory จึงมีน้ำตัวอย่างทั้งหมด 12 แหล่ง

4.2 สมบัติของน้ำเสีย

พิจารณาน้ำเสียจากทั้ง 4 โรงงานพบว่า น้ำที่ออกจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ ยังมีธาตุฟอสฟอรัสและไนโตรเจนในปริมาณที่สูง สารอาหารที่มากเกินมาตรฐาน ไม่มีการนำไปสร้างมูลค่าอย่างเป็นรูปธรรม โดยสถานประกอบการทั้งหมดที่ได้เข้าทำการสำรวจนั้น ไม่สามารถปล่อยน้ำเหล่านี้ลงสู่สิ่งแวดล้อมได้ โดยจะปล่อยน้ำลงในบ่อเปิด เพื่อให้น้ำซึมลงสู่ดิน และเกษตรกรรอบๆโรงงานสามารถนำไปใช้ในการเกษตรกรรม

น้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีสารอาหารที่ค่อนข้างสูงคือมีแมกนีเซียมไอออน (Magnesium:Mg^{2+}) 2,500 มิลลิกรัมต่อลิตร แอมโมเนียมไอออน (Ammonium:NH_4^+) 112 มิลลิกรัมต่อลิตร ฟอสเฟตไอออน(Phosphat:PO_4^{3-}) 137 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นสัดส่วนโมล Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-} 103:6:1 อีกทั้งความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่สูง ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) 5,700 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้เกิดกระบวนการตกผลึก MAP ได้ดี แต่ระบบบำบัดน้ำเสียมีปัญหาทำให้น้ำเสียหลังจากการผลิตก๊าซชีวภาพค่อนข้างไม่เสถียร มีความลำบากในการเข้าเก็บน้ำเสีย จึงไม่นำตะกอนและน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมาประกอบการพิจารณา

ในขณะที่น้ำจากกากตะกอนฟาร์มสุกรมีสารตั้งต้น MAP (Mg^{2+}, NH_4^+และ PO_4^{3-}) เท่ากับ 279, 450 และ 700 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ซึ่งถือเป็นปริมาณที่มาก แต่เนื่องด้วยหากนำระบบไปติดตั้งในโรงงานจริง จำเป็นต้องมีหน่วยกรองเอาตะกอนออกก่อนจึงจะสามารถนำน้ำเสียมาใช้ได้ ซึ่งเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่าย ทำให้ยากต่อการคุ้มทุน อีกทั้งความลำบากในการเข้าเก็บน้ำเสีย

จึงพิจารณาน้ำเสียที่ออกจากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง พบว่ามีสารอาหารมากเป็นอันดับสองคือมี Mg^{2+}, NH_4^+ และ PO_4^{3-} สูงถึง 650, 172 และ 202 มิลลิกรัมต่อลิตร (ตามตารางที่ 4.1) ปริมาณของแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ที่น้อย และถึงแม้ว่าค่าของแข็งแขวนลอยจะมีมาก แต่ก็สามารถกรองออกได้ อีกทั้งค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) ที่ไม่สูงมากนัก เฉลี่ยที่ 1,753 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามงานวิจัยของ N. Marti et al. (2552) พบว่าการตกตะกอน MAP จะน้อยลง ถ้าความกระด้างสูงขึ้น ประกอบกับค่าน้ำมันและก๊าซ (O&G) ในปริมาณที่ต่ำ จะช่วยให้การตกตะกอนดีขึ้น รวมไปถึงค่าสารอาหารอื่น ๆ เช่น โพแทสเซียมไอออน (K^+) ซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) เป็นต้น มีค่าไม่สูงมากนักอยู่ในเกณฑ์ที่พอรับได้ และเหตุผลทางทำเลที่ตั้งของโรงงานซึ่งอยู่ใกล้มหาวิทยาลัย การให้ความร่วมมือที่ดีของผู้ประกอบการ และกำลังการผลิตแป้งมันสำปะหลังที่มากถึง 100 ตันต่อวัน ทำให้มีน้ำเสียในแต่ละวันเฉลี่ย 1,200 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และความสะดวกในการเข้าเก็บน้ำเสีย จึงเลือกน้ำเสียจากโรงงาน ก. มาใช้ในการทดลอง

น้ำเสียที่นำมาพิจารณาในการทดลองจะทำการเก็บตัวอย่างในวันที่สภาพอากาศเป็นปกติ ฝนไม่ตก อุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส ได้ผลดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4-2 สมบัติของน้ำเสียจากโรงงาน ก., ข., ค., และ ง.

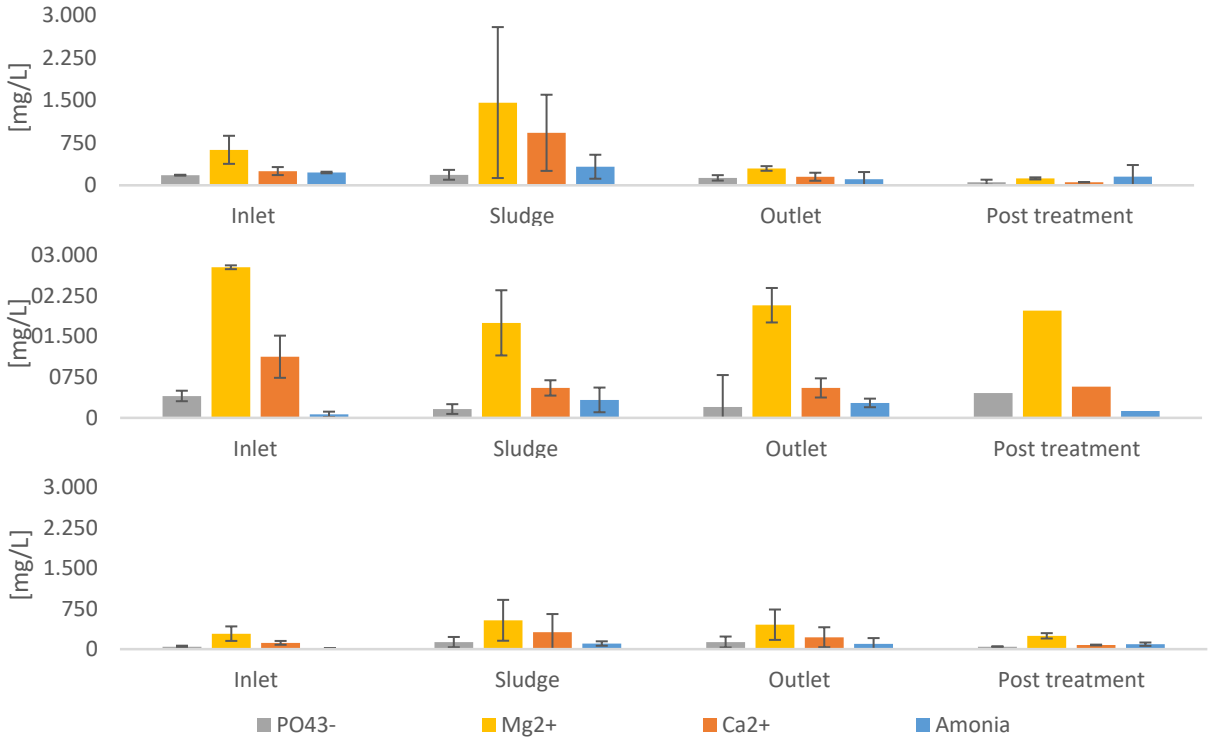
แหล่งน้ำ		pH	TS	TSS	TKN	NH_3	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Alkalinity	SO_4^{2-}	PO_4^{3-}
โรงงาน ก.	Sludge	7.1	64600	59900	981	73	550	800	2020	161	196
	Biogas Outlet	7.2	56250	55300	872	172	350	650	2000	27.6	202
	Post Treatment	7.8	1860	233	139	112	80	280	1240	-	36
โรงงาน ข.	Sludge	7.1	2310	575	166	131	75	265	1190	-	61
	Biogas Outlet	6.9	2430	910	262	22	88	252	1240	2.57	59
	Post Treatment	7.9	2110	440	127	68	70	210	1050	-	49
โรงงาน ค.	Sludge	7.4	14100	5270	476	112	650	2500	5700	9.96	137
	Biogas Outlet	8	7250	1160	164	70	450	1750	3500	30.5	42
	Post Treatment	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
โรงงาน ง.	Sludge	-	5,330	3,920	177	450	517	279	4.53	123	700
	Biogas outlet	-	920	2,500	196	200	267	278	6.78	97	700
	post treatment	-	22	218	7	56	134	210	-	22	100

หมายเหตุ : ทุกหน่วยมีค่า มิลลิกรัมต่อลิตร ยกเว้นค่าความเป็นกรดด่าง

4.2.1 ศักยภาพการผลิตปุ๋ยสตรูไวท์ของโรงงานเกษตรอุตสาหกรรมและฟาร์มสุกร

ตารางที่ ๑ แสดงผลการวิเคราะห์น้ำเสียที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบบำบัดน้ำเสีย พบว่าน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากโรงงานอุตสาหกรรมเกษตรและฟาร์มปศุสัตว์ มีศักยภาพในการนำมาผลิตปุ๋ยสตรูไวท์ น้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันปาล์ม มีลักษณะเป็นสีน้ำตาลข้น มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์และอนินทรีย์สูง

มากกว่าน้ำเสียโรงงานอื่น ๆ แม้จะผ่านการบำบัดแบบไร้อากาศแล้ว ส่วนน้ำเสียตัวอย่างที่ได้จากฟาร์มสุกรและโรงแป้งมีลักษณะและความเข้มข้นขององค์ประกอบลดลงมา ตามลำดับ (รูปที่ 4.6)



รูปที่ 4-6 แสดงสมดุลมวลฟอสฟอรัส ที่ได้จากการสำรวจโรงงานและเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวิเคราะห์ธาตุสารอาหาร

สำหรับน้ำเสียจากโรงแป้งมันสำปะหลังมีค่าฟอสเฟต และธาตุไนโตรเจนในปริมาณที่สูง โดยมีค่าพีเอช แมกนีเซียมไอออน ฟอสเฟตไอออน และแอมโมเนียมไอออน คือ 8.1, 35.8, 164.7, 198.2 มิลลิกรัมต่อลิตร

การตกผลึกสตรูไวท์ยังต้องการธาตุอาหารอื่น ๆ ในปริมาณที่เหมาะสม หลังทำนำน้ำเสียมาตรวจสอบพบว่า น้ำเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังมีสัดส่วนโมลของธาตุอาหารที่ต้องการ ซึ่งจากการคำนวณพบว่ามีแมกนีเซียมไอออนและแอมโมเนียมไอออนที่สูงถือเป็นสารตั้งต้นเหลือใช้การตกตะกอน โดยมีค่าฟอสเฟตอยู่ในช่วง 130-200 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการนำไปผลิตปุ๋ยสตรูไวท์

ตารางที่ 4-3 แสดงความเข้มข้นของไอออนต่าง ๆ ในน้ำเสียชนิดแตกต่างกัน

	POE-out	POE-post	Starch-out	Starch-post	Pig-out	Pig-post
Ca^{2+}	550	575	219	75	150	53
K^{+}	2630	2295	876	660	340	299
Mg^{2+}	2075	1975	451	245	296	121
NH_4^{+}	273	126	97	90	107	152
PO_4^{3-}	201	457	131	43	131	54

ตารางที่ 4-4 แสดงสัดส่วนโมล่าของไอออนต่าง ๆ ในน้ำเสีย

	POE-out	POE-post	Starch-out	Starch-post	Pig-out	Pig-post
Ca2+	6.51	2.99	3.99	4.19	2.73	2.35
K+	31.95	12.23	16.35	37.80	6.34	13.59
Mg2+	40.46	16.90	13.51	22.54	8.87	8.84
NH4+	7.19	1.46	3.92	11.18	4.31	14.99
PO43-	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

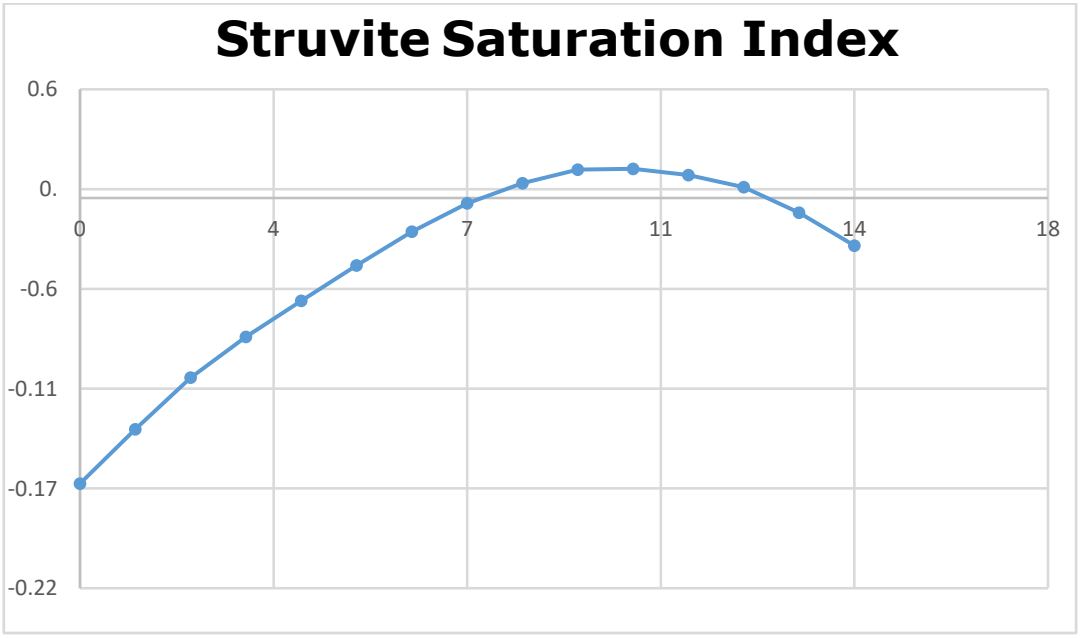
ถึงแม้ว่าน้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มจะมีความเข้มข้นของสารต่าง ๆ สูง แต่ในการทดลองขั้นต่อไปจะเลือกใช้น้ำจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง เนื่องจากน้ำเสียจากโรงงานปาล์มมีค่าน้ำที่สูง ซึ่งอาจจะทำให้เกิดความล่าช้าต่อการทดลองการผลิตปุ๋ยในงานวิจัยนี้ได้

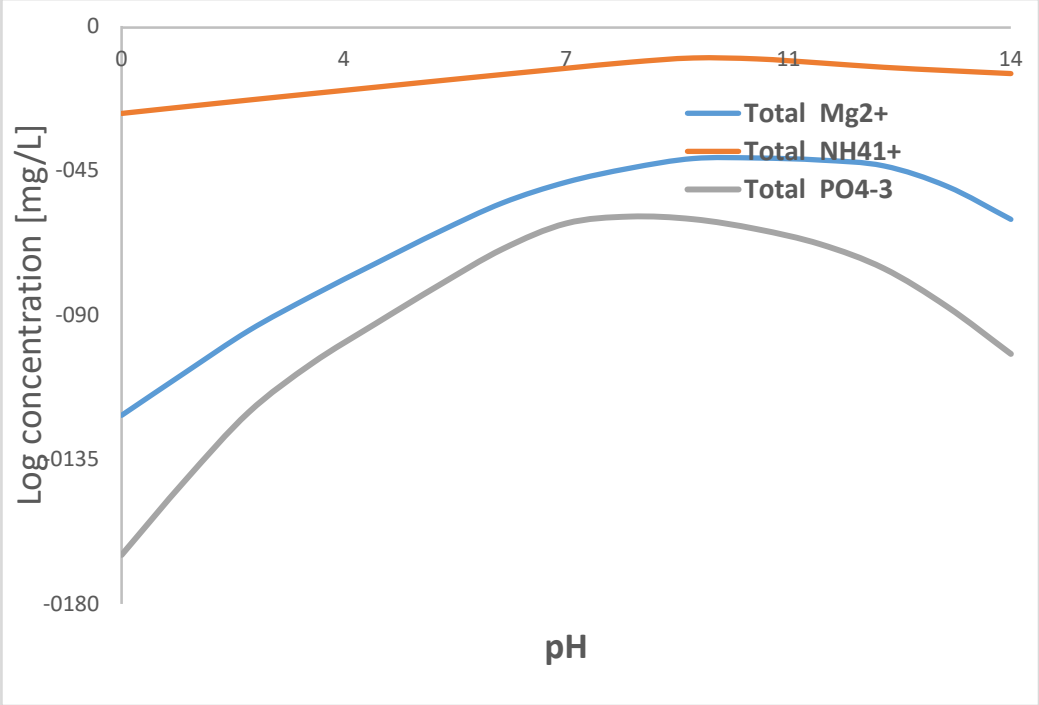
สำหรับฟาร์มสุกร การพิจารณาเข้าไปทำการทดสอบในระยะยาวมีความยากลำบากเนื่องจากสถานประกอบการไม่อนุญาติให้เข้าไปสำรวจเนื่องจากต้องการป้องกันการติดเชื้อโรคของฟาร์มโดยการจำกัดคนนอกเข้าสู่ฟาร์ม ส่วนน้ำเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหรับนั้น มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่สูงจะทำให้เกิดการกระบวนการตกผลึกของปุ๋ยสตรูไวท์เหมาะสม ผู้วิจัยจึงได้ทำการเลือกใช้นำเสียจากโรงงานสมิตรแป้งมัน เนื่องจากได้รับความร่วมมือในงานวิจัยเป็นอย่างดี ได้รับการสนับสนุนพื้นที่และการเข้าโรงงานทำได้ง่าย ระยะทางจากสถานที่ทำการทดลองไม่ไกลจากมหาวิทยาลัย และจากการทดสอบเบื้องต้นว่ามีศักยภาพในการผลิตปุ๋ยสตรูไวท์สูง

อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังมีความสำคัญกับประเทศไทยเป็นอย่างมาก น้ำเสียจากโรงงานมีค่าเฉลี่ยโดยประมาณ 10-15 ลูกบาศก์เมตรต่อตันแป้ง ซึ่งจำนวนโรงงานแป้งมันสำปะหลังในประเทศไทยมีมากกว่า 70 แห่งทั่วประเทศ ซึ่งมีกำลังผลิตแป้งมันอยู่ที่ 100-1000 ตันแป้งต่อวัน โดยมีการใช้ระบบบำบัดน้ำแบบไร้อากาศเป็นหลัก ทำให้มีศักยภาพในการขยายผลของงานวิจัยโครงการนี้ในอนาคต ผู้วิจัยจึงเลือกให้ใช้ทำการทดสอบการทดลองผลิตปุ๋ยสตรูไวท์จากน้ำเสียโรงงานแป้งมันสำปะหลังต่อไป

4.3 ผลการจำลองหาสถาวะที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอนปุ๋ยสตรูไวท์

ได้ใช้โปรแกรมคำนวณสมดุลทางเคมี MINTEQ ในการหาสภาวะที่เหมาะสมของการตกตะผลึกปุ๋ยสตรูไวท์ โดยพิจารณาจากข้อมูลน้ำที่วัดได้ คือ แมกนีเซียมไอออน แอมโมเนียมไอออน และฟอสเฟตไอออน มาคำนวณ พบว่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอนสตรูไวท์ อยู่ที่ 8-11 โดยความเข้มข้นของฟอสเฟตต่ำสุดเกิดขึ้นที่ พีเอช 8 แมกนีเซียมไอออน 9-12 และแอมโมเนียมไอออนที่พีเอช 9 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่พีเอชดังกล่าว





รูปที่ 4.7 ผลการจำลองหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอนปุ๋ยสตรูไวท์โดยใช้โปรแกรมสมดุลทางเคมี MINTEQ

4.4 ผลการทดลองการผลิตปุ๋ยสตรูไวท์

4.4.1 ผลการทดลองแบบกะ

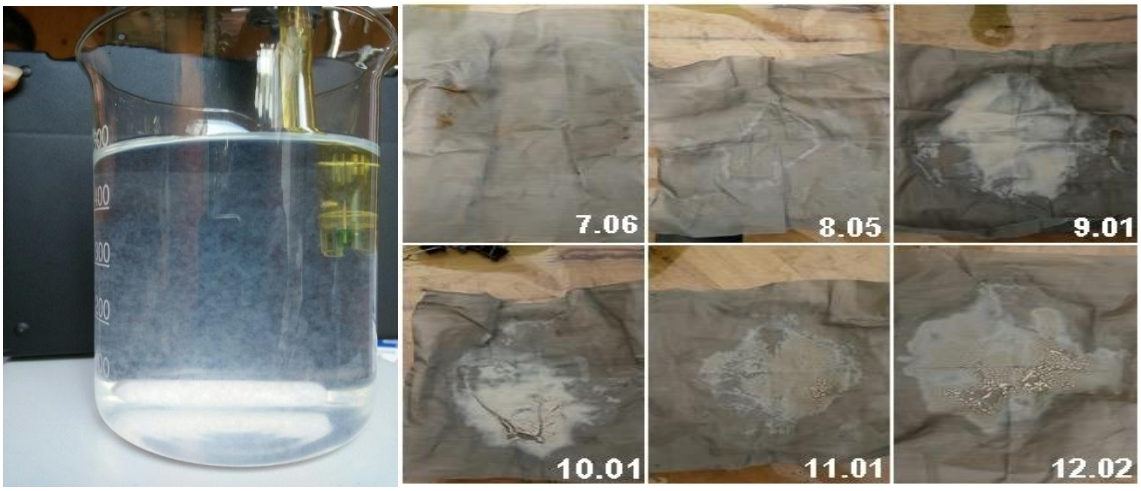
จากการพิจารณาศักยภาพการต่อยอดของการวิจัยการผลิตปุ๋ยสตรูไวท์จากน้ำเสียเกษตรอุตสาหกรรมและฟาร์มสุกรทั้ง ๓ ประเภทพบว่า โรงงานแป้งมันสำปะหลังมีน้ำเสียที่มีศักยภาพในการนำไปใช้ผลิตปุ๋ย และยังมีน้ำเสียที่เกิดขึ้นเป็นปริมาณมาก ฉะนั้นการทดลองต่อไปนี้ จะเป็นการนำน้ำเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังมาใช้ในการทดลอง

การทดลองที่ 1 ผลกระทบของความเป็นกรดด่าง (pH) ต่อการตกผลึกของปุ๋ยสตรูไวท์

เมื่อทำการทดลองตกตะผลึก MAP ที่ค่าความเป็นด่าง (pH) ต่างกัน พบว่าปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นแตกต่างกันมาก และสามารถลดสารอาหารในน้ำเสียได้ในปริมาณที่แตกต่างกันดังนี้

1. น้ำหนักของตะกอน

หลังจากที่ทำการกวนผสม น้ำเสียมีลักษณะใสขึ้น ตะกอนจะเริ่มจับตัวกัน และมีลักษณะเป็นสีขาวอย่างเห็นได้ชัด ดังในรูปที่ 4.2 (ก) เมื่อกรองตะกอนและทำให้แห้งโดยใช้อากาศและแสงแดด พบว่าลักษณะของสีของตะกอนมีการเปลี่ยนไปคือ มีสีน้ำตาลไปจนถึงเหลืองอ่อนดังในรูปที่ 4.2 (ข) เนื้อตะกอนมีขนาดเล็กละเอียด และมีปริมาณแตกต่างกันไปดังตารางที่ 4.2



(ก) (ข)

รูปที่ 4.8 (ก) ตะกอนเริ่มจับตัวหลังจากกวนผสมเสร็จ (ข) ตะกอนหลังจากกรองและทำให้แห้ง

ตารางที่ 4-5 น้ำหนักของตะกอนที่เกิดขึ้นจริง

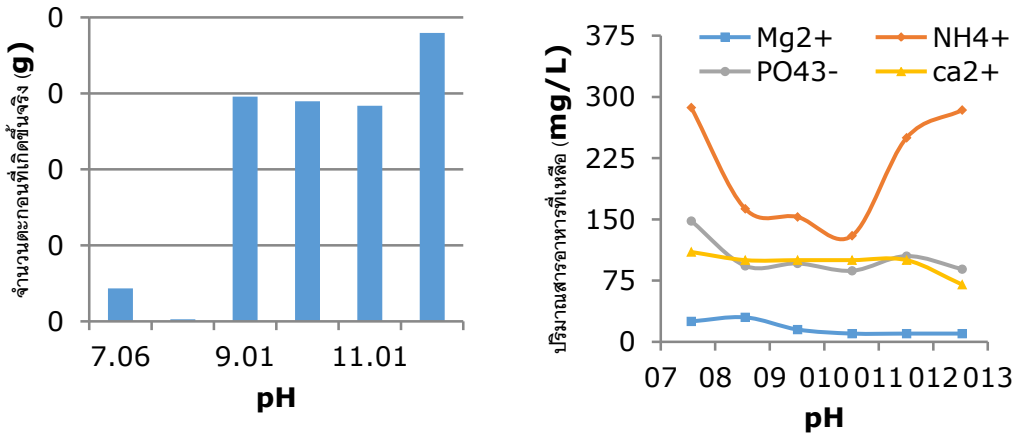
pH	**น้ำหนักของตะกอนที่เกิดขึ้นจริง (g)**
7.06	0.0195
8.05	0.0012
9.01	0.1331
10.01	0.1303
11.01	0.1277
12.02	0.1708

2. ปริมาณสารอาหารที่เหลืออยู่ในน้ำเสียหลังทำปฏิกิริยา

ทำการวัดสารอาหารในน้ำเสียที่นำมาใช้ในการตกตะกอนพบว่า น้ำเสียมี Mg^{2+} 45 มิลลิกรัมต่อลิตร, NH_4^+ 312 มิลลิกรัมต่อลิตร, PO_4^{3-} 144 มิลลิกรัมต่อลิตรและ Ca^{2+} 112.86 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากการตกผลึกแล้วเมื่อทำการแยกส่วนที่เป็นของแข็ง ของเหลวออกจากกัน และนำส่วนที่เป็นของเหลวมาวิเคราะห์สารอาหารที่เหลืออยู่ พบว่ามีค่าตามตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4-6 สารอาหารที่เหลืออยู่ในของเหลว

pH	Mg^{2+} (mg/L)	NH_4^+ (mg/L)	PO_4^{3-} (mg/L)	ca^{2+} (mg/L)
7.06	45	287	148	110
8.05	30	163	93	100
9.01	15	153	96	100
10.01	10	130	87	100
11.01	10	250	105	100
12.03	10	284	89	70



(ก) (ข)

รูปที่ 4-9 (ก) ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจริง (ข) ปริมาณสารอาหารที่เหลืออยู่

จากตารางที่ 4.2 พบว่า ที่ pH 7 และ 8 เกิดตะกอนน้อยมาก (0.0195 กรัม และ 0.0012 กรัม ตามลำดับ) แต่หากสังเกตดูรูปที่ 4.8 (ข) จะพบว่าไม่มีตะกอนเกิดขึ้นเลย ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ด้วยงานวิจัยของ Suzuki et al. (2005) ว่า “เมื่อ pH ลดลง สารประกอบเหล่านี้จะละลายน้ำได้ดี และแตกตัวเป็นไอออน

อิสระ” ส่วนที่ตะกอนมีน้ำหนักนั้น เพราะมีการกรองได้ของแข็งแขวนลอย ในสภาวะที่ pH เท่ากับ 12 เกิดตะกอนมากที่สุดคือ 0.1708 กรัม และมีการลดลงของ Mg^{2+}, NH_4^+ และ PO_4^{3-} มีค่า 77.78%, 8.81% และ 38.26% ตามลำดับ (ดังตาราง ค.4 ในภาคผนวก ค.) เมื่อคำนวณทางทฤษฎีพบว่าในน้ำเสีย 500 มิลลิลิตร มีธาตุอาหารตั้งต้น Mg^{2+}, NH_4^+ และ PO_4^{3-} เท่ากับ 1.85, 17.03 และ1.52 มิลลิโมล ตามลำดับ ในกรณีนี้ จึงได้ PO_4^{3-} เป็นสารกำหนดปฏิกิริยา นั่นคือจะได้ MAP สูงสุดคือ 1.52 มิลลิโมล หรือ 0.1041 กรัม และเมื่อพิจารณาการลดลงของสารอาหาร (ดังตาราง ค.4 ในภาคผนวก ค.) พบว่า Ca^{2+} ลดลงมากถึง 37.97% นั่นแสดงว่าเกิดการตกตะกอนร่วมของ Ca^{2+} ซึ่งสอดคล้องกับ Wendong Tao et al. (2558) ที่พบว่า Ca^{2+} จะตกตะกอนเป็น $Ca(OH)_2$ เมื่อ pH ที่ค่าสูงขึ้น และจะได้ผลึก $Mg(OH)_2$ เกิดขึ้นด้วย ซึ่งถือว่า MAP ที่ได้ไม่บริสุทธิ์ จึงพิจารณาที่ pH 9 และ 10 ซึ่งเกิดตะกอนมากเป็นอันดับสอง (0.1331 กรัม และ 0.1303 กรัม ตามลำดับ) ซึ่งใกล้เคียงกับที่คำนวณได้ และสามารถลดสารอาหารได้สูงถึง 66.67%, 50.87% และ 33.40% ตามลำดับ เพราะฉะนั้น MAP ที่ได้ จึงมีปริมาณและความบริสุทธิ์มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Suzuki et al. (2005) ที่ศึกษาการตกผลึก MAP ของน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร พบว่าตกตะกอนได้ดีที่สุดที่ pH 8.5 และจากการศึกษาของ Rahman et al. (2011) ที่ศึกษาการตกตะกอน MAP น้ำเสียจากฟาร์มวัว ซึ่งพบว่าเกิดตะกอนได้ดีที่ pH 8-9 เช่นกัน และสามารถลด NH_4^+ และ PO_4^{3-} ไปได้ 31% และ 93% ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียที่ออกจากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพของโรงงานแป้งมันปะหลังพบว่าสามารถลด NH_4^+ และ PO_4^{3-} ได้เพียง 50.87% และ 33.40% ซึ่งน้อยกว่าค่อนข้างมาก ทั้งนี้เพราะลักษณะน้ำเสียโรงงานแป้งมันสำปะหลังที่มีสารอาหารน้อยกว่า ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) และค่าของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ (TSS) ที่สูงถึง 2,000 และ 55,300 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจะทำให้การตกผลึก MAP น้อยลง (N. Marti et al. 2009)

การทดลองที่ 2 ศึกษาอัตราส่วนความเข้มข้นแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) และฟอสเฟตไอออน (PO_4^{3-})

เนื่องด้วยปริมาณที่มากเกินพอของ NH_4^+ จึงเลือกศึกษาความเข้มข้นของสารตั้งต้นระหว่างแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) และฟอสเฟตไอออน (PO_4^{3-}) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการตกตะกอน MAP และปริมาณที่น้อยของ PO_4^{3-} จึงทำให้ PO_4^{3-} เป็นสารกำหนดปริมาณ (Limiting Reagent)

1. ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจริง

ใช้แอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Ammonium di-hydrogen Phosphate: $NH_4H_2PO_4$) ในการปรับปริมาณของ Mg^{2+} และ PO_4^{3-} ให้ได้อัตราส่วน 1:2, 1:1 และ 2:1 ตามลำดับ ปรับปริมาณธาตุอาหารให้สัดส่วนอยู่ที่ pH ที่เหมาะสมในการเกิดตะกอนที่ดีที่สุด คือ 9 โดยใช้ NaOH ในการปรับ pH ซึ่งเป็นสารที่ทำให้ Mg^{2+} ตกตะกอนได้อย่างสมบูรณ์ และทำให้การตกตะกอนของ Ca^{2+} เกิดไม่สมบูรณ์ (ดังในภาคผนวก ค.) และด้วยความเข้มข้นของ Mg^{2+} และ PO_4^{3-} ที่ต่างกัน ในขณะที่ความเข้มข้นของ NH_4^+ ที่มากเกินพอ (excess) จึงทำให้ได้ตะกอนที่ต่างกันดังนี้

รูปที่ 4-10 ตะกอน MAP ที่ความเข้มข้นต่างกัน

ตารางที่ 4-7 น้ำหนักตะกอนที่เกิดขึ้นจริง

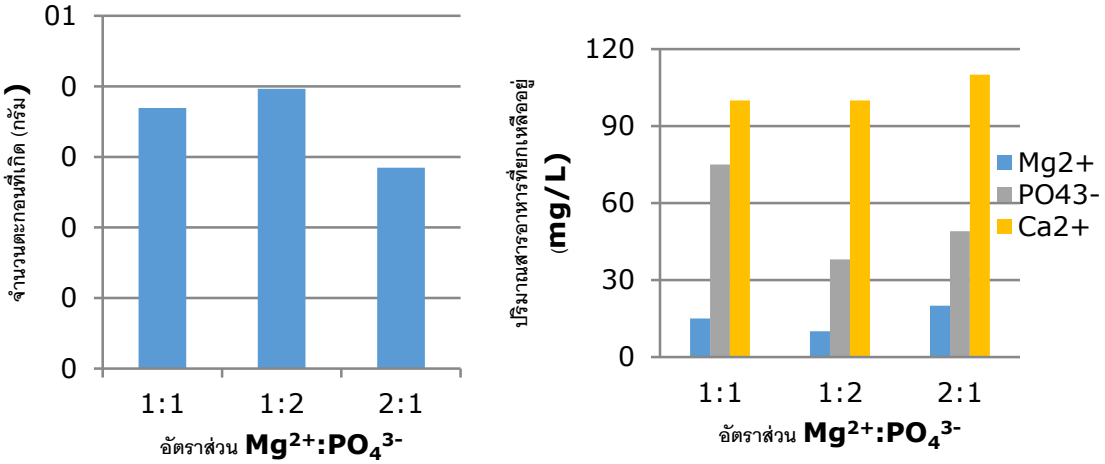
อัตราส่วน Mg^{2+} : PO_4^{3-}	น้ำหนักตะกอนที่เกิด (กรัม)
1 : 1	0.4247
1 : 2	0.4562
2 : 1	0.3275

2. ปริมานสารอาหารที่เหลือ

นำน้ำเสียจากการทดลองที่ 1 มาปรับปริมาณ Mg^{2+}:PO_4^{3-} ให้ได้อัตราส่วนตามที่กำหนด โดยกำหนดให้ NH_4^+ มีปริมาณมากเกินพอ (Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-} เป็น 2.06 : 15.11 : 1.89) และควบคุมสภาวะความเป็นกรด-เบส (pH) โดยเลือกค่า pH ที่ทำให้สารอาหาร MAP ลดลงมากที่สุด หลังจากตกตะกอน ทำการแยกส่วนที่เป็นของแข็งและของเหลวออกจากกัน และนำส่วนที่เป็นของเหลวมาวิเคราะห์สารอาหารที่เหลืออยู่ ดังตารางที่ 4-8

ตาราง 4-8 ปริมาณสารอาหารที่เหลือ

หาอัตราส่วน Mg^{2+}:PO_4^{3-}	Mg^{2+} (mg/L)	PO_4^{3-} (mg/L)	Ca^{2+} (mg/L)
1:1	15	75	100
1:2	10	38	100
2:1	20	49	110



(ก) (ข)

รูปที่ 4-11 (ก) ตะกอนที่เกิดที่อัตราส่วนต่างกัน (ข) ปริมาณสารอาหารที่เหลือหลังจากตกตะกอน

โดยน้ำที่ใช้ในการทดลองมาจากตัวอย่างเดียวกัน มีธาตุอาหารในปริมาณที่เท่ากัน ซึ่งมี Mg^{2+}, NH_4^+ และ PO_4^{3-} เท่ากับ 50, 272 และ 180 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็น 2.06, 15.11 และ 1.89 มิลลิโมลต่อลิตร และเมื่อทำการกำหนดปริมาณ Mg^{2+} : PO_4^{3-} ในอัตราส่วน 1:1 เพราะฉะนั้น PO_4^{3-} จะถูกปรับให้มีจำนวนโมลเท่ากับ Mg^{2+} โดยการเติม $NH_4H_2PO_4$ 8.93 มิลลิกรัม ในขณะที่อัตราส่วนโมลเท่ากับ 2:1 ปริมาณ Mg^{2+} ที่ใช้จะถูกปรับให้มีจำนวนโมลมากเป็นสองเท่าของ PO_4^{3-} โดยการเติม $MgCl{\cdot}6H_2O$ จำนวน 98.52 มิลลิกรัม อย่างไรก็ตามอัตราส่วนที่สามารถตกผลึก PO_4^{3-} ได้มากที่สุดคืออัตราส่วน 1:2 โดย PO_4^{3-} จะถูกปรับให้มีปริมาณโมลมากเป็นสองเท่าของ Mg^{2+} โดยการเติม $NH_4H_2PO_4$ 123.82 มิลลิกรัมซึ่งจะสามารถนำ Mg^{2+} และ PO_4^{3-} กลับมาใช้ได้สูงสุดถึง 80.00% และ 90.26% ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าการตกผลึกที่ pH 9 และไม่มีการเติมสารเคมี (โดยสามารถนำกลับมาใช้ได้เพียง 66.67% และ 33.40% ตามลำดับ) ซึ่งเกิดจากการเติม $NH_4H_2PO_4$

เข้าไปนั้น ทำให้ปริมาณ PO_4^{3-} ซึ่งเป็นสารกำหนดปริมาณ (limiting reagent) เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการตกผลึกมากขึ้นถึง 0.45 กรัม และพบว่าสีของผลึกที่อัตราส่วนต่าง ๆ มีสีเหมือนกันคือน้ำตาลเข้ม

4.4.2 วิเคราะห์ผลการทดลองแบบกะ

น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ เป็นวิธีที่ผู้ประกอบการหลาย ๆ ที่เลือกใช้ เนื่องด้วยความสามารถในการนำก๊าซชีวภาพที่ได้กลับไปใช้ในสถานประกอบการของตน แต่หลายครั้งจะพบว่าน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดนั้น จะยังมีสารอาหารตกค้างอยู่มาก จากคุณสมบัติของน้ำเสียจากทั้งสามแหล่งพบว่าตะกอนฟาร์มหมูมีสารอาหารโดยรวมอยู่มากที่สุด แต่เนื่องจากเมื่อต้องการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมจริงจะต้องมีหน่วยกรองเอากากตะกอนออกก่อน จึงจะนำมาใช้ตกผลึกปุ๋ยได้ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายให้แก่ผู้ประกอบการ ซึ่งยากต่อการคุ้มทุน และยังยากต่อการเข้าเก็บน้ำเสียอีกด้วย ในขณะที่น้ำเสียที่ออกจากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพของโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง มีสารอาหารที่มากเป็นอันดับสอง เหตุผลทางทำเลที่ตั้ง และการให้ความร่วมมืออย่างดีของผู้ประกอบการ น้ำเสียที่ออกจากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังจึงมีความเหมาะสมมากกว่า

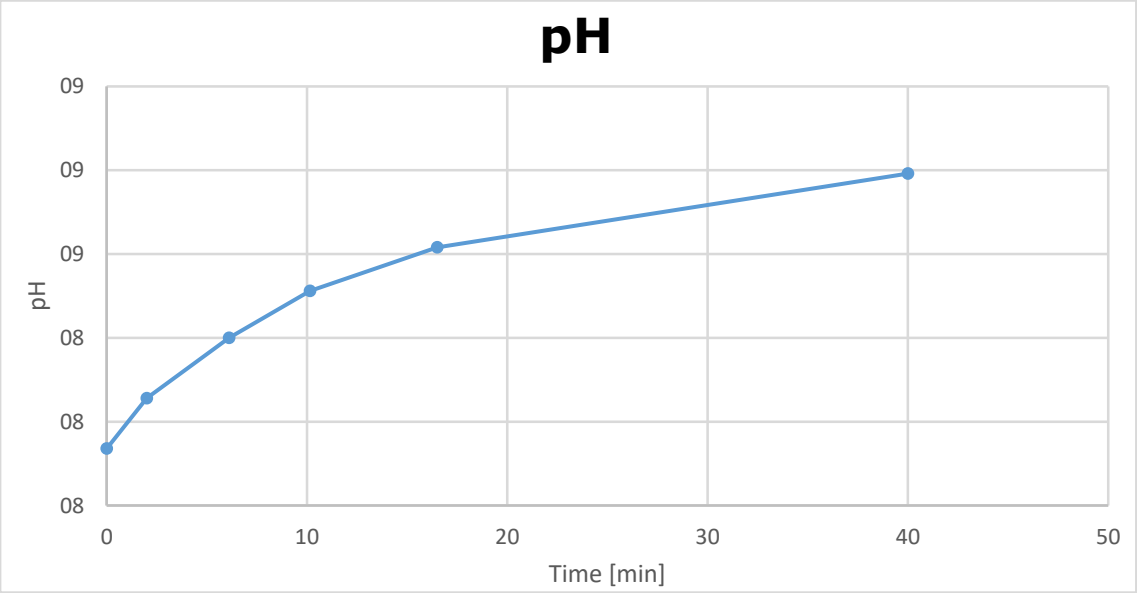
จากการศึกษาผลกระทบของความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่มีผลต่อการตกตะกอน MAP พบว่าที่ pH 12 เกิดตะกอนมากที่สุดนั่นคือ 0.1708 กรัม แต่เมื่อคำนวณทางทฤษฎีแล้วพบว่า MAP ตกตะกอนได้สูงสุดที่ 0.1041 กรัม นั่นแสดงว่ามีการตกตะกอนของไอออนอื่นร่วมด้วย จึงพิจารณาการลดลงของสารตั้งต้นพบว่ามีการลดลงของ Mg^{2+}, NH_4^+ และ PO_4^{3-} ที่ 77.78%, 8.81% และ 38.26% ตามลำดับ นอกจากนั้นพบว่าแคลเซียมไอออนลดลง 37.97% ทำให้เชื่อได้ว่ามีแคลเซียมไอออนตกตะกอนร่วมกับ MAP ทำให้ MAP ที่ได้มีความบริสุทธิ์น้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับที่ pH 9 พบว่าสารตั้งต้น ลดลง 66.67%, 50.87% และ 33.40% ตามลำดับ และแคลเซียมไอออนลดลง 11.39% ซึ่งน้อยกว่าที่ pH 12 เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Rahman et al. (2011) และ Lui et al. (2011) ที่ศึกษาการตกตะกอน MAP ของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรซึ่งตกผลึกได้ดีที่สุดที่ช่วงพีเอช 8.0-9.0 และ 7.82-8.92 ตามลำดับ และงานวิจัยของ Le Corre et al. (2007) ทำการตกผลึก MAP จากน้ำเสียสังเคราะห์พบว่าตกตะกอนได้ดีที่สุดที่ pH 8.5-10.5 ซึ่งเมื่อพิจารณารูปที่ 4.3 (ข) จะพบว่าสารอาหารเหลือน้อยที่สุด เมื่อ pH อยู่ที่ 9-10 ซึ่งสอดคล้องกับ pH-speciation diagram ที่แสดงว่าฟอสฟอรัสในน้ำเสียซึ่งจะอยู่ในรูปของฟอสเฟตไอออน ไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของ NH_4^+ และคาร์บอเนตไอออน มีค่าต่ำในช่วง pH 9 ถึง 10 และจากกราฟยังแสดงให้เห็นว่าแคลเซียมไอออนเริ่มลดลงตั้งแต่ pH 11 เป็นต้นไป นั่นแสดงว่าเป็น pH ที่ไม่เหมาะสมต่อการตกผลึกเพื่อให้ได้ MAP

ศึกษาความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่มีผลต่อการตกผลึก MAP โดยให้น้ำเสียมี NH_4^+ ในปริมาณที่มากเกินพอ(excess) (คิดเป็น 15.11 ต่อ PO_4^{3-} 1.89) จึงเลือกทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นแมกนีเซียมไอออนต่อฟอสเฟตไอออน (Mg^{2+}:PO_4^{3-}) พบว่าที่อัตราส่วน 1:2 สามารถลด Mg^{2+} และ PO_4^{3-} ได้

มากถึง 80.00% และ 90.26% ตามลำดับ และเกิดผลึกเป็นปริมาณ 0.45 กรัม ทั้งนี้การลดลงของสารอาหารจะมีปริมาณมากกว่าการทดลองที่ 1 (ที่ pH เดียวกัน) ค่อนข้างมาก (33.40% และ 90.26% ตามลำดับ) ทั้งนี้เพราะมีการเติม $NH_4H_2PO_4$ ซึ่งมีส่วนประกอบของ PO_4^{3-} ที่เป็นสารกำหนดปริมาณ (Limiting reagent) และเมื่อฟอสเฟตมีมากขึ้น ก็จะยิ่งจับกับแมกนีเซียม ทำให้เกิดการตกผลึกได้มากขึ้นตามไปด้วย อีกทั้งสารที่ใช้ในการปรับ pH คือ NaOH ซึ่งเป็นสารที่ช่วยให้แมกนีเซียมไอออนตกตะกอนได้อย่างสมบูรณ์ในขณะที่ทำให้แคลเซียมตกตะกอนได้อย่างไม่สมบูรณ์ (ดังในภาคผนวก ค) ความเข้มข้นของสารตั้งต้นจึงลดไปได้เป็นปริมาณมาก

4.4.3 ผลของการเติมอากาศ

ได้ทำการทดสอบการเติมอากาศในน้ำเสีย ๘๐๐ มิลลิลิตร ซึ่งมีการเติมอากาศ ๓๐ นาที ด้วยอัตรา 60 ลิตรต่อนาที โดยค่าพีเอชของน้ำเสียเริ่มต้นที่ 7.92 และเพิ่มเป็น 8.76 ภายในระยะเวลา 40 นาที จากการทดลองพบว่า การเพิ่มของพีเอชนั้น เป็นเพราะคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายน้ำ ($CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3$ หรือกรดคาร์บอนิก) ได้ถูกไล่ออกจากน้ำตัวอย่าง ซึ่งการเติมอากาศนั้น จะทำให้ใช้สารเคมีเพื่อปรับค่าพีเอชให้สูงขึ้นในปริมาณน้อยลง อย่างไรก็ตามพบว่าปริมาณผลึก MAP ที่ได้จากน้ำเสียที่มีการเพิ่มค่าพีเอชโดยการเติมอากาศนั้น มีน้อยกว่าการทดลองในสภาวะเดียวกันที่ใช้สารเคมีเป็นตัวปรับพีเอช จึงสรุปได้ว่าจำเป็นต้องมีการเพิ่มสารเคมีเพื่อเพิ่มพีเอชเพื่อให้สามารถตกผลึกสตรูไวท์ในปริมาณที่มากขึ้น



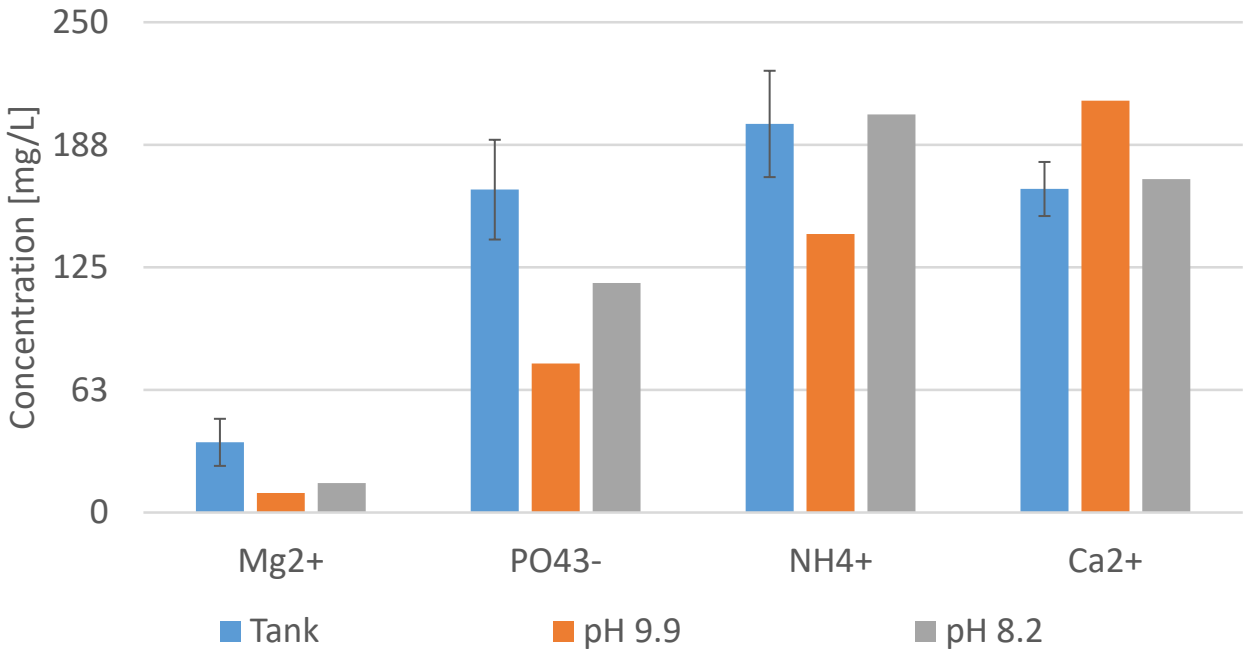
รูปที่ 4-12 แสดงพีเอชของน้ำเสียแป้งมันสำปะหลังหลังจากเติมอากาศเป็นระยะเวลา 40 นาที

4.4.4 ผลการทดลองการผลิตปุ๋ยสตรูไวท์แบบต่อเนื่อง

การทดสอบแบบต่อเนื่องทำโดยเดิน 2 ระบบในหลอดทดลอง โดยหลอดทดลองที่ 1 มีการเดินระบบแบบปกติ และอีกหนึ่งหลอดทดลองได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่าง ๆ เช่น ค่าพีเอช การเติมอากาศ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และเดินระบบแบบสองขั้นตอนโดยเพิ่มการกวนระหว่างการทำปฏิกิริยา เพื่อศึกษาหาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ต่อการผลิตปุ๋ยสตรูไวท์ ซึ่งเป็นการจำลองการเดินระบบแบบต้นแบบจริง โดยมีการป้อนน้ำเข้าสู่ระบบอย่างต่อเนื่อง โดยเมื่อทำการศึกษาถึงผลกระทบของค่าการเดินระบบต่าง ๆ แล้ว จะสามารถทำให้ออกแบบทางวิศวกรรมของระบบต้นแบบเพื่อผลิตปุ๋ยสตรูไวท์ได้เหมาะสมที่สุดได้

ผลของพีเอช

การเพิ่มพีเอชในระบบการเดินแบบต่อเนื่องนั้น ทำโดยการเติมสารละลาย NaOH เข้าไปสู่ท่อปั๊มน้ำเสีย และจากผลการทดลองแบบต่อเนื่อง พบว่าเมื่อพีเอชมีค่าสูงขึ้น ค่าสารอาหารในน้ำมีค่าลดลง โดยแมกนีเซียม ฟอสเฟต และแอมโมเนียม ลดสอดคล้องกับผลการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบกะ

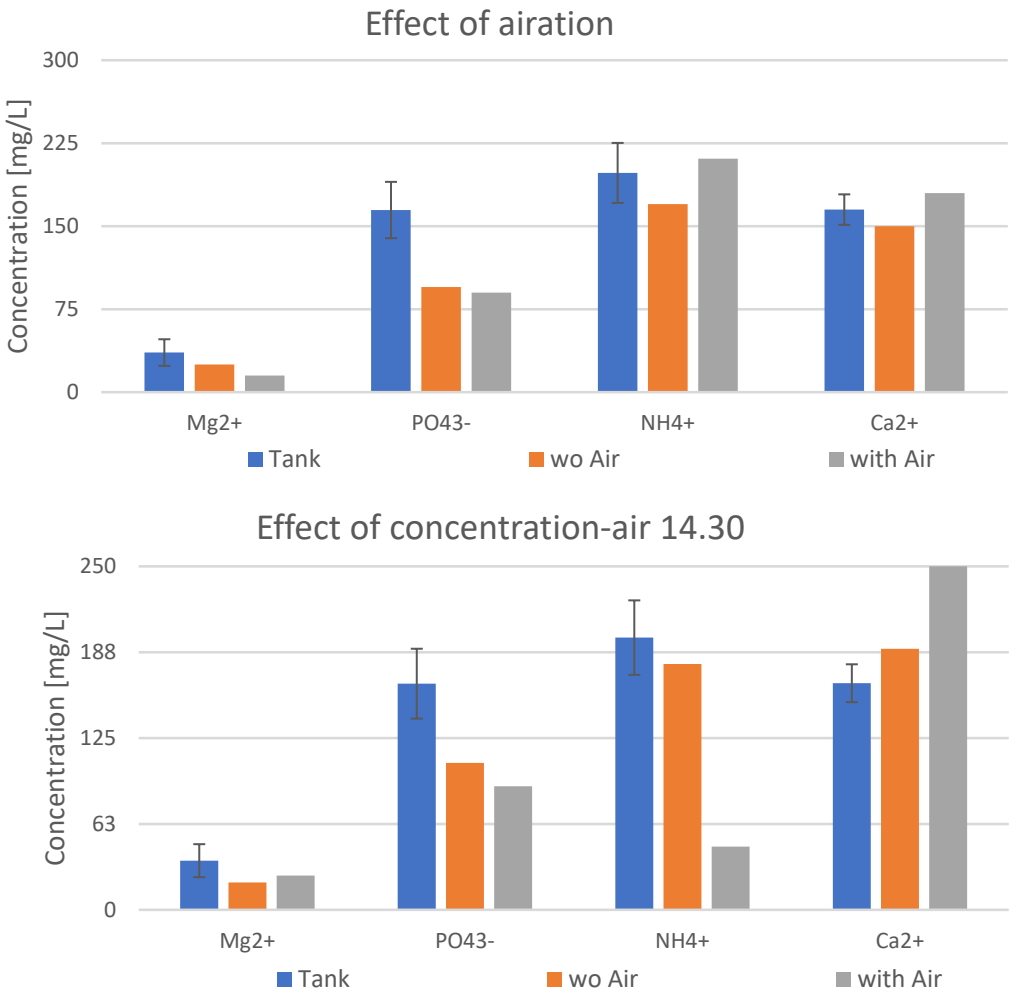


รูปที่ 4-13 แสดงผลการลดลงของไอออต่าง ๆ ในน้ำที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน

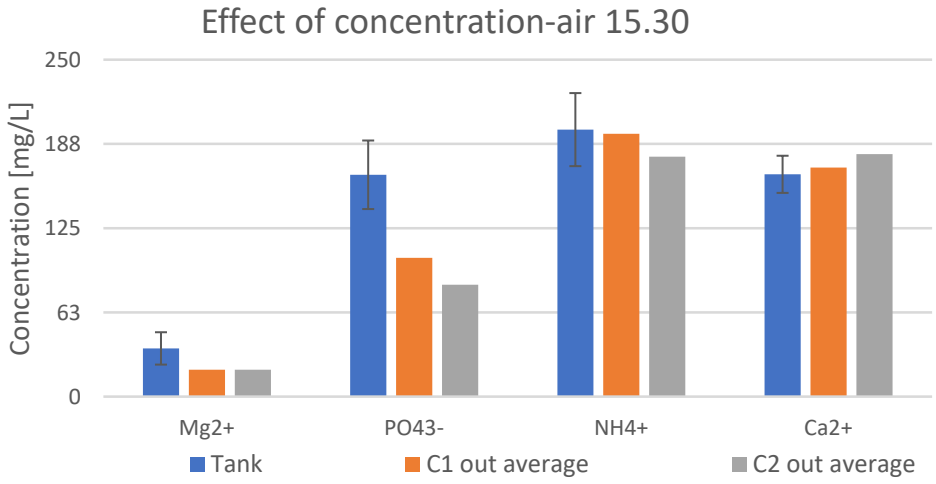
ผลกระทบของการเติมอากาศ

ผลการทดสอบในถังปฏิกรณ์แบบกะ มีความสอดคล้องกับทฤษฎีคือ การลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำซึ่งจะทำให้พีเอชมีค่าสูงขึ้น สำหรับการทดลองในระบบต่อเนื่อง พบว่าผลของการเติมอากาศต่อ

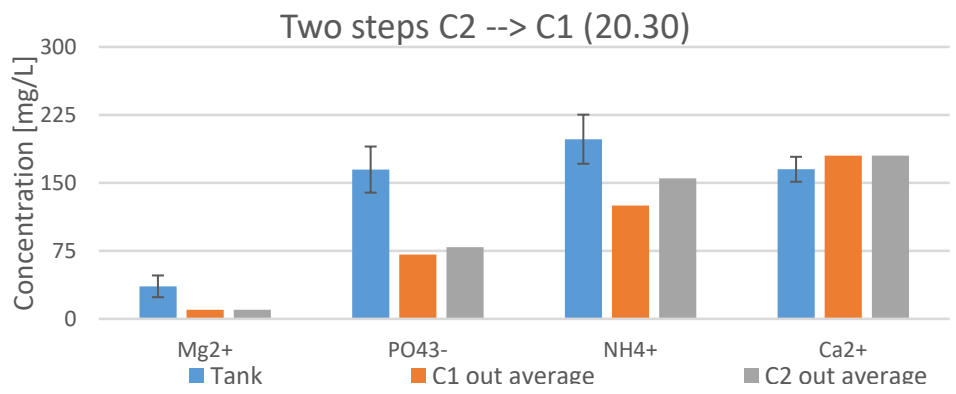
ค่าพีเอชมีน้อยคือ พีเอชของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ที่มีการเติมอากาศ และไม่เติมอากาศมีค่าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามพบว่าคอลัมน์ที่เติมอากาศทำให้การลดลงของธาตุอาหารมีมากขึ้น ทั้งนี้ผลกระทบของการเติมอากาศที่น้อยอาจจะเป็นเพราะระยะเวลาการละลายออกอากาศเข้าไปสู่น้ำนั้นทำได้น้อยในระบบขนาดเล็ก



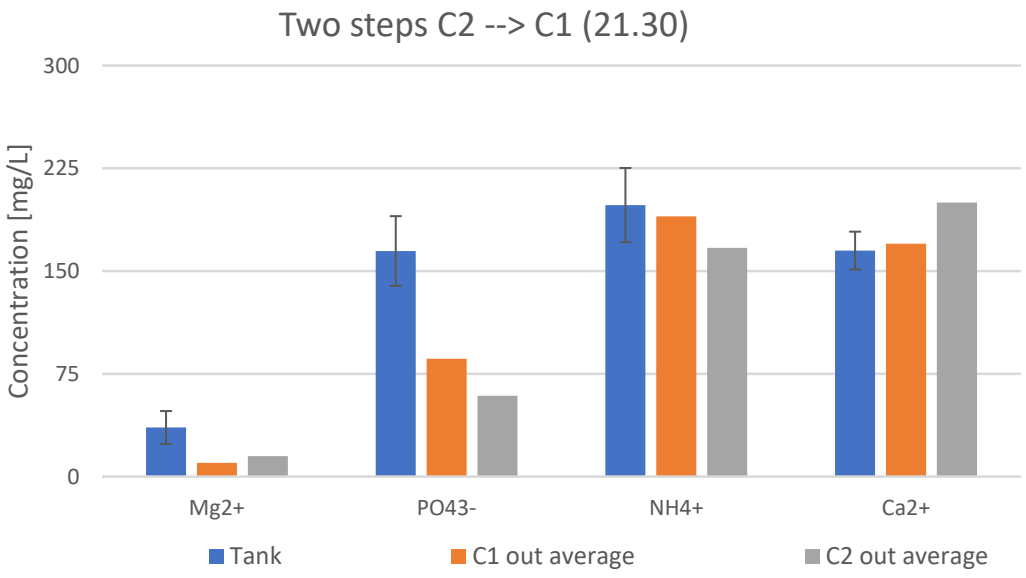
รูปที่ 4-14 แสดงผลการเติมอากาศต่อการลดลงของไอออนต่าง ๆ ในน้ำ เทียบกับคอลัมน์ที่ไม่เติมอากาศ



ผลกระทบของการเดินระบบสองขั้นตอน



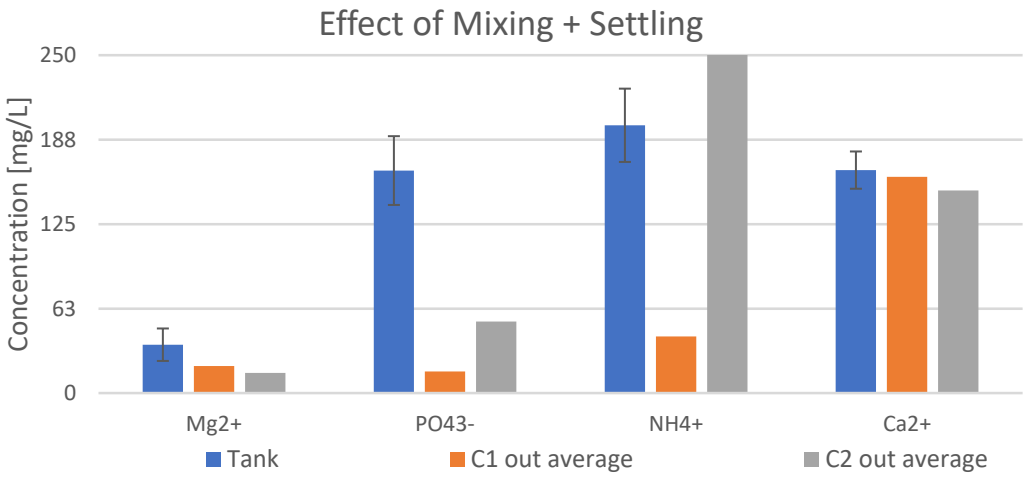
รูปที่ 4-15 แสดงผลการลดลงของไอออนต่าง ๆ ในน้ำ ด้วยการเดินระบบแบบสองขั้นตอน (C2 มีการเติมอากาศ และน้ำออกจาก C2 ถูกป้อนเข้า C1 เพื่อตกตะกอน)



รูปที่ 4-16 แสดงค่าฟอสเฟตไอออนในน้ำที่ค่าพีเอชต่าง ๆ จากการทดลองแบบ Batch รวมทั้งน้ำหนักของตะกอนที่ผลิตได้

เพื่อทดสอบการเพิ่มระยะเวลา จึงแบ่งขั้นตอนการตกตะกอนเป็น ๒ ขั้นตอน คือ ทำกการเติมอากาศและเติมสารเคมีในกรวยที่ ๑ และน้ำจากรวยที่ ๑ จะถูกส่งไปยังกรวยที่ ๒ เพื่อตกตะกอน โดยมีสมมุติฐานว่าระยะเวลาการตกตะกอนที่นานขึ้นจะทำให้เกิดการลดลงของธาตุอาหารมีเพิ่มมากขึ้น

จากผลการทดสอบพบกว่า การเพิ่มขั้นตอนการทำปฏิกิริยาจาก ๑ เป็น ๒ ขั้นตอน หรือ เพิ่มระยะเวลาทำปฏิกิริยาจาก ๒ เป็น ๔ ชั่วโมง นั้น สามารถเพิ่มความสามารถในการลดค่าฟอสเฟต และแอมโมเนียม ได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามความสามารถในการลดค่าต่าง ๆ นั้นมีเพียงไม่เกิน ๕-๑๐ เปอร์เซนต์



รูปที่ 4-17 แสดงผลของการเดินระบบสองขั้นตอนที่มีการกวนในขั้นตอนที่ 1

ผลกระทบของการเดินระบบแบบสองขั้นตอนโดยมีการกวนสมบูรณ์

เดินระบบ 2 ขั้นตอน โดยมีการกวนสมบูรณ์ในขั้นตอนแรก และนำน้ำที่ผ่านขั้นตอนการกวนในขั้นตอนแรก มาตกตะกอนในขั้นตอนที่สอง พบว่า สามารถลดค่าสารอาหารละลายในน้ำได้สูงสุด โดยฟอสเฟตลดลงกว่า 90% อย่างไรก็ตามด้วยวิธีการดังกล่าวจำเป็นต้องใช้พลังงานเพื่อให้การกวนสมบูรณ์

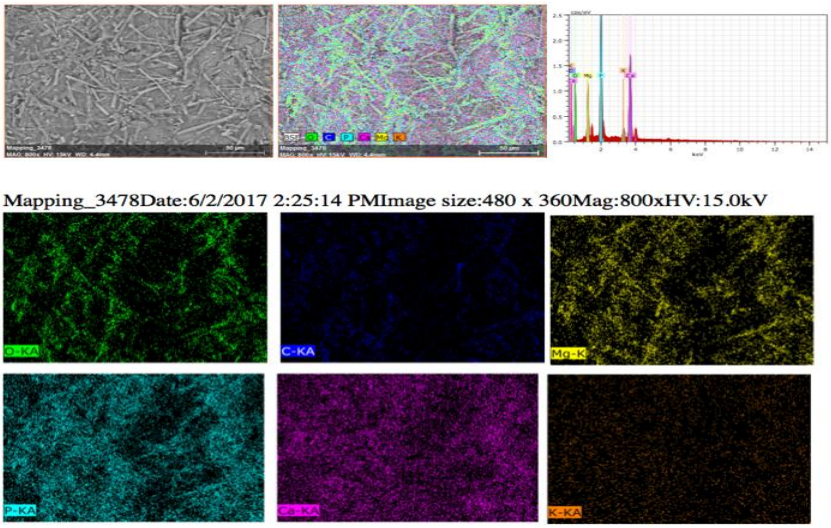
4.5 ผลการทดสอบวิเคราะห์คุณสมบัติปุ๋ย

ได้นำปุ๋ยที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการด้วยน้ำเสียที่ได้จากโรงงานจริง โดยตัวอย่างปุ๋ยที่มีการส่งตรวจวัดได้แก่ ตัวอย่างปุ๋ยที่ได้จากการทดลองมีค่า pH = 9.00 และ pH = 10.00 และปุ๋ยที่ได้จากการเปลี่ยนสัดส่วนค่า ธาตุแมกนีเซียมกับฟอสเฟตในสัดส่วน 2:1 ที่ค่าพีเอช 9 และ 10

จากผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDX ของตัวอย่างปุ๋ยที่ผลิตได้ทั้ง 4 ตัวอย่าง พบว่ามีธาตุชนิดเดียวกันได้แก่ ฟอสฟอรัส (P) แคลเซียม (Ca) โพแทสเซียม (K) แมกนีเซียม (Mg) ออกซิเจน (O) และคาร์บอน (C) ซึ่งหากเรียงตามปริมาณของธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์ พบว่ามีปริมาณฟอสฟอรัส (P) มากที่สุด รองลงมาคือ แคลเซียม (Ca) คาร์บอน (C) โพแทสเซียม (K) แมกนีเซียม (Mg) และออกซิเจน (O) ตามลำดับ ในขณะที่ตัวอย่างที่ได้ทำการปรับเปลี่ยนสัดส่วน แมกนีเซียมและฟอสเฟต จะมีปริมาณฟอสฟอรัส (P) มาก

ที่สุด รองลงมาคือ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) แมกนีเซียม (Mg) โพแทสเซียม (K) และแคลเซียม (Ca) ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์รูปแบบผลึกด้วยเทคนิค XRD พบว่าทั้ง 4 ตัวอย่างมีรูปแบบผลึกเหมือนกัน แสดงว่าตัวอย่างปุ๋ยทั้ง 4 ตัวอย่างนี้มีสารประกอบชนิดเดียวกัน ซึ่งจากการอ้างอิงจากฐานข้อมูลในโปรแกรม XRD Shimadsu สารประกอบดังกล่าวน่าจะคือ KMgPO4·6H20 หรือ K-Struvite, Calcium oxide (CaO) และ Phosphorus oxide (P2O5).



รูปที่ 4-18 ผลการวิเคราะห์ธาตุโดยใช้เทคนิค EDX ของตัวอย่างน้ำหลังกระบวนการที่มีค่า pH = 9.00

4.6 ผลการทดสอบการละลายน้ำของปุ๋ยสตรูไวท์เทียบกับปุ๋ยอื่นๆ

เพื่อทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติของปุ๋ยสตรูไวท์ที่ผลิตได้กับปุ๋ยชนิดอื่น ๆ ได้ทำการทดลองนำปุ๋ยที่ได้มาทดสอบการละลายน้ำโดยได้นำปุ๋ยที่ผลิตได้และปุ๋ยที่ซื้อมาจากท้องตลาดมาบรรจุใส่คอลัมน์ด้วยปริมาณ ๕ กรัม โดยทำการทดลองดังรูปที่ 4.19 ซึ่งประกอบด้วยหลอดทดลองที่บรรจุทราย ปุ๋ยสตรูไวท์กับทราย ปุ๋ยดอกไม้กับทราย และปุ๋ยเคมีกะบทราย ทำการจำลองการละลายน้ำ โดยการนำน้ำประปาปั๊มเข้าสู่หลอดทดลองด้วยความเร็วคงที่เป็นระยะเวลาที่กำหนด โดยแต่ละหลอดการทดลองจะได้รับปริมาณน้ำที่เท่ากัน

จากผลการทดสอบ พบว่าปุ๋ยสตรูไวท์ให้ค่าพีเอชเริ่มต้นที่สูงกว่าปุ๋ยชนิดอื่น ๆ คือประมาณ ๑๐ ก่อนที่จะลดลงเป็น ๘ ในวันที่ ๑๐ ในขณะที่ปุ๋ยดอกไม้มีพีเอชของน้ำที่ละลายนั้นอยู่ที่ประมาณ ๘ ถึง ๙ ส่วนปุ๋ยเคมีให้พีเอชที่ต่ำในช่วงแรกคือพีเอช ๔ ก่อนที่จะเพิ่มขึ้นมาที่พีเอชใกล้เคียงกับหลอดทดลองที่มีแต่ทราย

ผลการวิเคราะห์ธาตุอาหารทางเคมีพบว่า ปุ๋ยเคมีปล่อยสารอาหารที่มีความเข้มข้นมาก สามารถละลายได้รวดเร็วและถูกละลายหมดภายในเวลาประมาณหนึ่งวัน โดยให้ค่าฟอสเฟตและไนโตรเจนในประมาณที่สูงถึง ๕,๐๐๐ และ ๗,๐๐๐ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ อย่างไรก็ตามปุ๋ยเคมีนั้นละลายน้ำไปอย่างรวดเร็วและหมดไปภายในวันที่ ๒ ของการทดลอง

ความเข้มข้นของสารอาหารของปุ๋ยดอกไม้สูงในช่วงแรก คือธาตุแมกนีเซียม ๑๒๐ มิลลิกรัมต่อลิตร ธาตุฟอสเฟตที่ ๓๐ มิลลิกรัมต่อลิตร และธาตุไนโตเจน ๑๐๐ มิลลิกรัมต่อลิตร

ปุ๋ยสตรูไวท์ซึ่งมีสูตรเคมีคือ แมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต โดยมีส่วนประกอบหลักคือธาตุแมกนีเซียมและธาตุฟอสเฟตสามารถละลายน้ำได้ในช่วงแรกน้อย อย่างไรก็ตามเมื่อค่าพีเอชลดลงพบว่าปุ๋ยสตรูไวท์สามารถปล่อยธาตุสารอาหารมาได้อย่างต่อเนื่อง และมีปริมาณมากขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อเทียบกับปุ๋ยชนิดอื่น ๆ ที่ธาตุอาหารปล่อยมาในช่วงแรก ๆ และหมดไปอย่างรวดเร็ว การที่ปุ๋ยสตรูไวท์ปล่อยธาตุอาหารมาอย่าง ต่อเนื่องในปริมาณที่ไม่มากนั้น สอดคล้องกับผลการวิจัยอื่น ๆ ที่ระบุว่าสตรูไวท์เป็นปุ๋ยละลายช้า และเหมาะสำหรับดินที่เป็นกรด

รูปที่ 4-19 การทดสอบการละลายน้ำของปุ๋ย

4.7 ผลการนำปุ๋ยที่ได้ปลูกพืช

นำปุ๋ยสตรูไวท์ที่ผลิตได้มาทดสอบการปลูกพืช เช่น กวางตุ้ง โหระพา คะน้าและพริก พบว่าสามารถนำปุ๋ยสตรูไวท์ไปปลูกพืชชนิดต่าง ๆ โดยไม่ทำให้เกิดความเสียหาย อย่างไรก็ตามระยะเวลาการดำเนินการยังไม่เพียงพอที่จะทำการศึกษาผลกระทบของปุ๋ยชนิดนี้ในระยะยาว และนอกจากนั้นแล้วระหว่างการทดลองนั้นเกิดมีพายุทำให้การทดลองปลูกพืชด้วยปุ๋ยชนิดดังกล่าวนั้นมีปัญหา ฉะนั้นควรจะมีงานวิจัยต่อเนื่องในหัวข้อดังกล่าวนี้ให้ได้

รูปที่ 4-20 แสดงค่าฟอสเฟตไอออนในน้ำที่ค่าพีเอชต่าง ๆ จากการทดลองแบบ Batch รวมทั้งน้ำหนักของตะกอนที่ผลิตได้

บทที่ 5

ระบบต้นแบบผลิตปุ๋ยสตรูไวท์การวิเคราะห์ทางเทคนิค เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อม

5.1 ระบบต้นแบบผลิตปุ๋ยสตรูไวท์

5.1.1 สถานที่ทดสอบเดินระบบต้นแบบ

ผู้วิจัยได้ทำการคัดเลือกลักษณะน้ำเสียที่ จะทำการวิจัยต่อในระดับภาคสนาม โดยมีเหตุผลดังต่อไปนี้

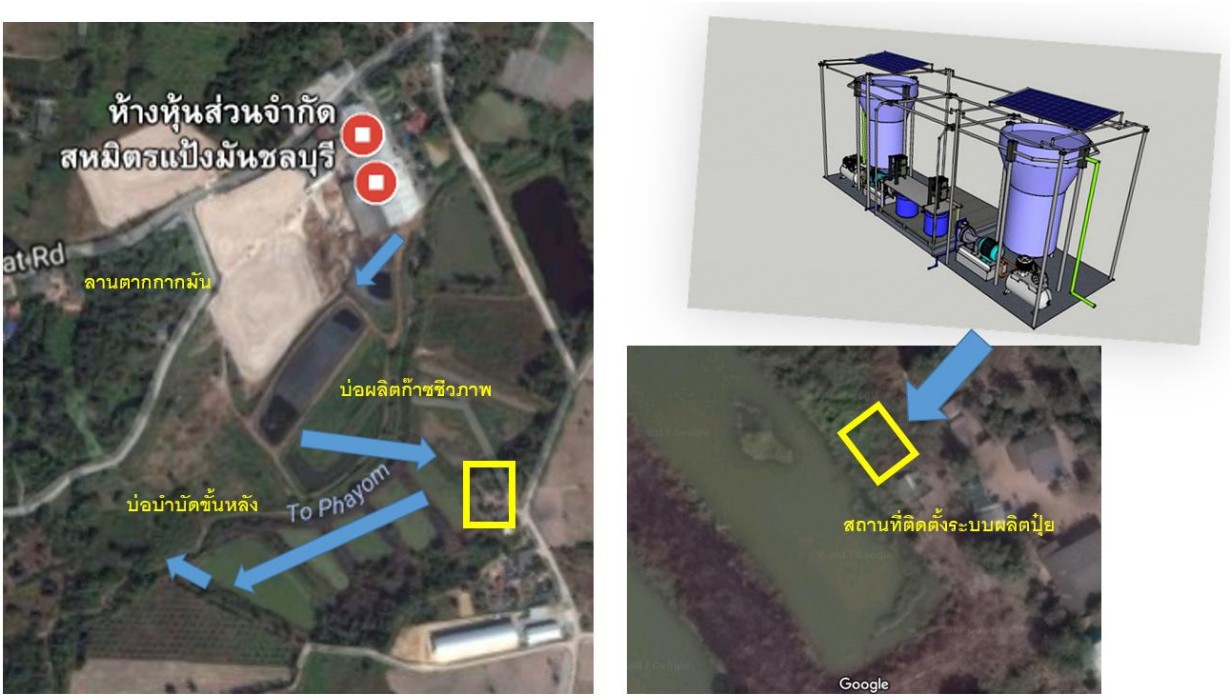
1. น้ำเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังมีศักยภาพในการผลิตปุ๋ยสตรูไวท์
2. สถานที่ที่จะทำการทดสอบระบบ pilot plant นั้น ทีมงานวิจัยสามารถเดินทางเข้าออกได้อย่างสะดวก เนื่องจากระบบบำบัดอยู่ห่างรอบนอกจากพื้นที่โรงงาน ส่วนเหตุผลที่ไม่คัดเลือกน้ำเสียจากโรงปาล์มในเบื้องต้น เนื่องมาจากลักษณะน้ำเสียที่แม้จะผ่านการบำบัดแล้ว มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์และอนินทรีย์สูงซึ่งจะมีผลต่อการตกตะกอนปุ๋ยสตรูไวท์ ส่วนสาเหตุที่ไม่คัดเลือกฟาร์มสุกร เนื่องมาจากการเข้าไปในพื้นที่ฟาร์มมีความจำกัดเนื่องจากระบบบำบัดไร้อากาศในฟาร์มที่ ๑ นั้นยังไมเสร็จสมบูรณ์ และในฟาร์มที่ ๒ ไม่สะดวกให้เข้าไปทดสอบ และผู้ประกอบการต้องการป้องกันการแพร่กระจายของเชื้อโรคต่าง ๆ เข้าสู่ฟาร์มสุกร

5.1.2 แนวความคิดการออกแบบระบบต้นแบบสำหรับการทดลองระดับโรงงาน

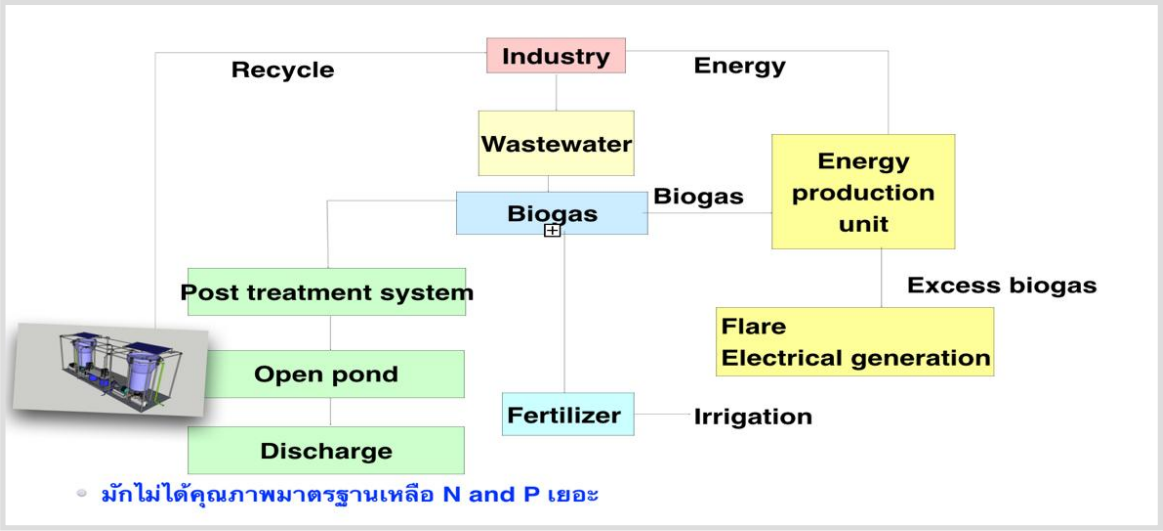
น้ำเสียจากอุตสาหกรรมการเกษตรที่ผ่านการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนยังคงเหลือสารอาหารที่ยังเป็นประโยชน์อยู่ น้ำเสียจะถูกปั๊มเข้าทางด้านล่างของถังที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าด้านบนทำให้ด้านล่างของถังมีอัตราเร็วกว่าด้านบนเปรียบเสมือนการกวนเร็วและช้า ทั้งนี้การตกตะกอนสตรูไวท์ต้องอยู่ในสภาวะพีเอช และสัดส่วนโมลของสารเคมีที่เหมาะสม ควบคุมด้วยระบบเซ็นเซอร์จับค่าการเติมสารเคมีโดยอัตโนมัติ อีกทั้งมีการเติมฟองอากาศเข้าไปเพื่อลดการใช้ปุ๋ยเคมี และมีการนำตะกอนที่เกิดขึ้นออกมาทำให้ความชื้นลดลง จำเป็นต้องตากแห้ง หรืออบแห้ง มีลักษณะเป็นผง สามารถอัดเม็ดได้ ระบบผลิตปุ๋ยสตรูไวท์จะถูกนำมาติดตั้งหลังจากระบบผลิตก๊าสชีวภาพโดยธาตุอาหารที่เหลือในน้ำจะตกผลึกเป็นปุ๋ย และสามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยอัดเม็ดฟอสเฟตได้ ด้วยวิธีดังกล่าว น้ำที่ออกจากระบบผลิตปุ๋ยสตรูไวท์จะมีค่าความเข้มข้นของฟอสเฟต ไนโตรเจน แมกนีเซียม โพแทสเซียมลดลง

การออกแบบมีดังนี้

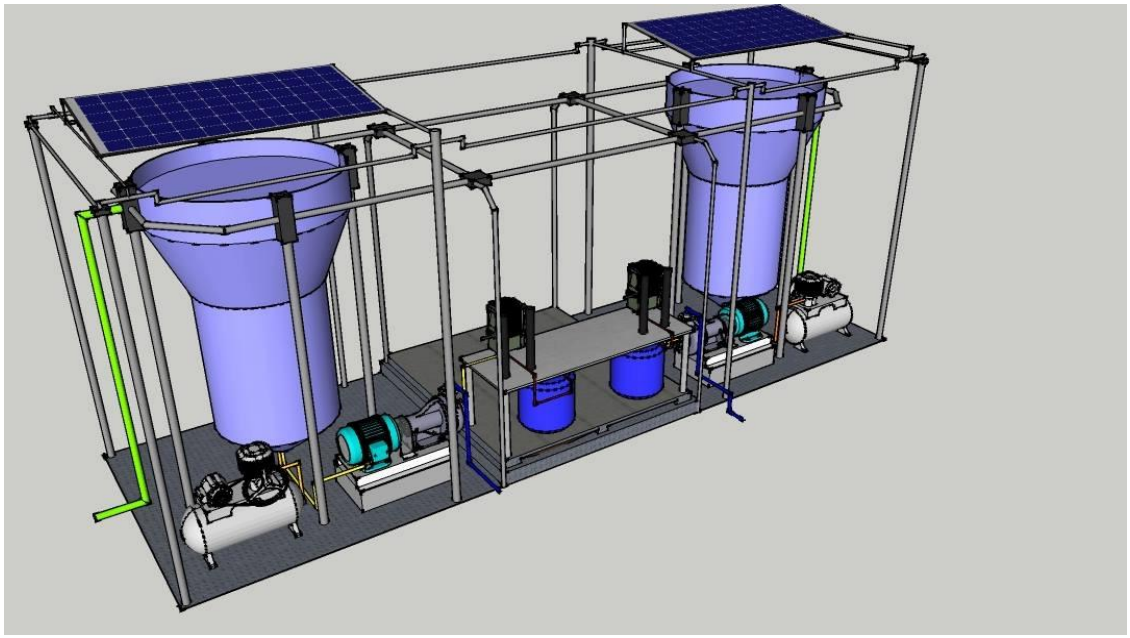
1. ประกอบด้วยถังปฏิกรณ์ไฟเบอร์กลาสขนาด ๒ ลบ.ม. จำนวน ๒ ถัง รวมเป็น ๔ ลบ.ม. สามารถรองรับน้ำเสียได้ ๔ ถึง ๖ ลบ.ม.ต่อ ชั่วโมง ซึ่งจากการประเมินจะสามารถผลิตปุ๋ยได้จำนวน ๒๔ กก ถึง ๓๖ กก (น้ำหนักแห้ง)
2. ปั๊มอากาศ ปั๊มน้ำ และเครื่องวัดและควบคุมพีเอชของน้ำเข้า และถังผสมสารเคมี คือ ด่าง



รูปที่ 5-1 สถานที่ทำการติดตั้งระบบ หรือ ห้างหุ้นส่วนสหมิตรแป้งมันชลบุรี



รูปที่ 5-2 สถานที่ทำการติดตั้งระบบ หรือ ห้างหุ้นส่วนสหมิตรแป้งมันชลบุรี



รูปที่ 5-3 ระบบต้นแบบผลิตปุ๋ยสตรูไวท์ (แบบมีใช้แผงผลิตพลังงานแสงอาทิตย์)

5.1.3 **การก่อสร้างและติดตั้งระบบต้นแบบ**

1. ระบบต้นแบบได้มีการติดตั้งที่ โรงงานสหมิตรแป้งมัน
2. น้ำที่ใช้ในการนำมาผลิตปุ๋ยคือน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดก๊าซชีวภาพบ่อที่ ๑

5.1.4 **การติดตั้งระบบผลิตปุ๋ยสตรูไวท์ต้นแบบ**

รูปที่ 5-4 แสดงการติดตั้งระบบต้นแบบผลิตปุ๋ยสตรูไวท์

5.1.5**เดินระบบต้นแบบ**

การทดลองระดับภาคสนามมีเป้าหมายเพื่อทำการเดินระบบในสภาวะที่น้ำเสียมีการเปลี่ยนแปลงทางคุณสมบัติอย่างต่อเนื่อง ทั้งด้านของชลศาสตร์ และทางเคมีของน้ำเสีย ค่าใช้จ่ายในการเติมสารเคมี วัสดุอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการออกแบบถังปฏิกรต้นแบบ ศึกษาถึงความยากง่ายทางเทคนิคในการดำเนินระบบ ณ สถานการณ์จริง โดยจะออกแบบระบบทดลองภาคสนามจะมีขนาดผลิตปุ๋ยสตรูไวท์ปริมาณอย่างน้อย 25 กก ต่อวัน ทำการเดินระบบแบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 2 เดือน โดยระบบต้นแบบจะทำการเดิน ณ โรงงานสหมิตรแป้งมัน จากผลการเดินระบบดังกล่าวได้นำปุ๋ยสตรูไวท์ที่ได้ประเมินทาง สิ่งแวดล้อม เศรษฐศาสตร์ และการลงทุน

ในช่วง 2-3 อาทิตย์แรกของการติด ได้เดินระบบต้นแบบเพื่อทดสอบไฮดรอลิค ระบบน้ำ ระบบปั๊ม ระบบควบคุมปั๊มและพีเอชต่าง ๆ จึงไม่ได้มีการเก็บน้ำตัวอย่างมาวิเคราะห์ พบว่ามีปุ๋ยสตรูไวท์ตกผลึกภายในถังปฏิกรณ์ในช่วงระยะเวลาทดสอบระบบดังกล่าว เริ่มมีการเก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์อย่างต่อเนื่องตามตารางที่

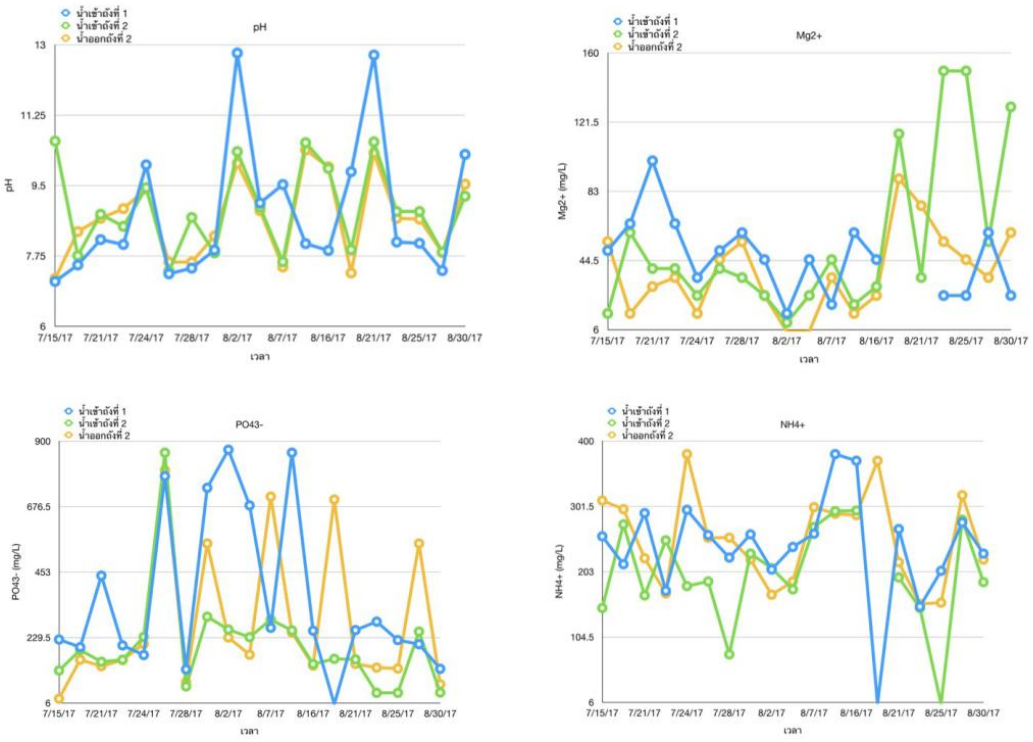
พบว่าระบบมีความไม่เสถียรในการควบคุมค่าพีเอชเท่าที่ควร ทั้งนี้เพราะมีปัญหาเรื่องวงจรไฟฟ้า และเนื่องจากระบบต้องรองรับน้ำจากบ่อบำบัดก๊าซชีวภาพจึงทำให้น้ำเสียมาอย่างไม่ต่อเนื่อง หรือบางครั้งโรงงานเกิดไฟฟ้าดับ ทำให้ค่าน้ำเสียที่ได้นั้นมีค่าไม่คงที่ อย่างไรก็ตามเมื่อมีกาเดินระบบอย่างต่อเนื่องแล้วพบว่า เกิดการตกผลึกปุ๋ยสตรูไวท์อย่างต่อเนื่อง และสามารถผลิตปุ๋ยได้อย่างดี

รูปที่ 5-5 แสดงการตกผลึกปุ๋ยสตรูไวท์ระหว่างการเดินระบบ

ตารางที่ 5-1 การเดินระบบต้นแบบ

วันปี/เดือน/	กิจกรรม	pHin	pH Reactor 1	pH Reactor 2
2/8/2017	เก็บตัวอย่างน้ำ		9	
3/8/2017	น้ำแห้ง ขาดบ่อ ดูดไม่ขึ้น		8.5	
4/8/2017	เก็บตัวอย่างน้ำ เติมสารเคมี โซดาไฟ		6.5	
5/8/2017	ทำความสะอาด ตัดหญ้ารอบๆ		10	
6/8/2017	ไฟฟ้าตก ดับช่วงกลางคืน		7.5	
7/8/2017	เก็บตัวอย่างน้ำ เติมสารเคมี โซดาไฟ	6.8	10.1	10.2
8/8/2017	ปกติ ไฟฟ้าตก ดับ 13.40 น.	10.4	10	10.6
9/8/2017	เก็บตัวอย่างน้ำ	10.2	9.7	9.5
10/8/2017	ทำกะโหลกแตก ปิดระบบ	9.0	9.0	7.2
11/8/2017	นำตะกอนออกจากถังทำระบบใหม่	-	-	-
12/8/2017		-	-	-
13/8/2017	เดินระบบใหม่เติมสารเคมี โซดาไฟ	-	7	9
14/8/2017	สายยางเติมสารเคมี หลุด	8.5	8.9	7
15/8/2017	สายเติมสารเคมีหลุด เติมโซดาไฟ	7.1	7.2	8
16/8/2017	สายยางตัน ต้องต่อใหม่ เก็บตัวอย่างน้ำ	9	9.3	9.4
17/8/2017	น้ำแห้ง ขาดบ่อ ดูดไม่ขึ้น	8.7	8.7	8.5
18/8/2017	สายยางตัน ต้องต่อใหม่ เก็บตัวอย่างน้ำ	7.2	8.2	8.3
19/8/2017	ไฟตก เครื่องมีปัญหา ช่วงกลางคืน	8.2	9.3	9.0
20/8/2017	เติมสารเคมี เกลือ และโซดาไฟ	8	8.2	8.9
21/8/2017	เก็บตัวอย่างน้ำ	10.2	10.2	10.1
22/8/2017	เติมสารเคมี โซดาไฟ	8.5	8.5	9.4
23/8/2017	เก็บตัวอย่างน้ำ	11.4	11.4	11.2

24/8/2017	ปกติ	10.5	10.4	10.4
25/8/2017	เติมถังสารเคมี เก็บตัวอย่างน้ำ	9.0	9.8	9.9
26/8/2017	ท่อกะโหลกตัน	11.1	8.0	8.0
27/8/2017	ปกติ	11.1	8.0	8.0
28/8/2017	เก็บตัวอย่างน้ำ	8.2	8.1	9.4
29/8/2017	เติมสารเคมี โซดาไฟ	9.5	9.7	9.5
30/8/2017	เก็บตัวอย่างน้ำ	8.5	8.5	8.4
31/8/2017	จบการเดินระบบ			



รูปที่ 5-6 แสดงการสำรวจภาคสนามของโรงแป้งมันสำปะหลัง

รูปที่ 5-7 ตัวอย่างน้ำเข้า น้ำออกจากถังที่ 1 น้ำออกจากถังที่ 2 และตะกอนของน้ำถังที่ 1 และ 2

5.1.6 สรุปผลการวิเคราะห์ทางเทคนิค

1. เทคโนโลยีผลิตปุ๋ยสตรูไวท์จากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมและน้ำเสียฟาร์มปศุสัตว์ ทำได้ไม่ยาก มีขั้นตอนเทคนิคที่ไม่ยาก เพราะเป็นวิธีทางเคมี
2. น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบก๊าซชีวภาพมีค่าระดับพีเอชที่เหมาะสม มีองค์ประกอบธาตุสารอาหาร คือ แมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสเฟตที่เหมาะสมสามารถนำมาผลิตเป็นปุ๋ยสตรูไวท์ได้
3. จากการทดสอบพบว่า น้ำเสียจากโรงงานปาล์ม น้ำแป้งมันสำปะหลัง และฟาร์มสุกรสามารถนำมาผลิตปุ๋ยสตรูไวท์ได้ โดยมีศักยภาพการผลิตปุ๋ยดังนี้ คือ ตามลำดับ
4. การควบคุมระบบสามารถทำโดยให้เดินระบบอัตโนมัติ ควบคุมค่าพีเอชและการเติมสารเคมีได้
5. ปุ๋ยที่ได้ต้องมีการตากแห้ง ฉะนั้นในฤดูฝนอาจจะมีปัญหาไม่สามารถตากตะกอนให้แห้งได้
6. น้ำเสียที่ผ่านระบบบำบัดอาจจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันทำให้ปุ๋ยที่ได้มีคุณภาพที่แตกต่างกัน
7. โรงงานไม่ได้มีการโม่มันตลอดปี ทำให้ไม่ได้มีน้ำเสียตลอดปี แต่ก็สามารถผลิตปุ๋ยได้ทันที ไม่ต้องมีการสตาร์ทอัป เหมือนระบบก๊าซชีวภาพ

5.1.7 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ การตลาดและการลงทุน

เพื่อวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ จึงทำการสมมุติโครงการติดตั้งระบบผลิตปุ๋ยสตรูไวท์ต้นแบบขนาดโรงงานจริงจากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจากโรงงานเกษตรอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง ระบบผลิตปุ๋ยสตรูไวท์ที่จะติดตั้งมีกำลังการผลิตปุ๋ยรองรับน้ำเสียได้ นต่อวัน.ม.ลบ 1200-800มีข้อมูลการเดินระบบดังนี้

ตารางที่ 5-2 ราคาระบบขนาดโรงงาน (หน่วย: บาท)

รายการที่ใช้ไปของเงินงบประมาณ	รวม
1. ค่าวัสดุ-อุปกรณ์-ครุภัณฑ์	
1.1 ค่าถังปฏิกรณ์ผลิตปุ๋ย	355,000
1.2 ค่าลานตากปุ๋ย	50,000
1.3 ค่าระบบสารเคมี	50,000
1.4 ค่าเครื่องเติมอากาศ	70,000
1.5 ค่าอุปกรณ์ไฟฟ้า	50,000
1.6 ค่าอุปกรณ์ระบบ	20,000
รวมสินทรัพย์ถาวร	
2. ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน	
2.1 ค่าตอบแทนที่ปรึกษาโครงการ 2 คน x 15,000 บาท x 12 เดือน	480,000
2.2 ค่าจ้างผู้ช่วยวิจัย 2 คน x 15,000 บาท x 12 เดือน	360,000
2.3 ค่าวิเคราะห์สารอาหารในน้ำเสีย	150,000
2.4 ค่าวิเคราะห์องค์ประกอบปุ๋ย	150,000
2.5 ค่าตรวจรับมาตราฐานเกษตรอินทรีย์	115,000
2.6 ค่าสารเคมี	150,000

แผนการดำเนินงานของโครงการ

รายละเอียดการดำเนินงาน	เดือน											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1.สำรวจพื้นที่ติดตั้ง												
2. ออกแบบระบบการตกตะกอนสตรูไวท์และลานตากตะกอน												
3.ก่อสร้างและติดตั้ง												
4.เดินระบบไฟฟ้าและระบบน้ำ												
5.ระบบป้อนสารเคมี												
6.ลานตากตะกอน												
7.ทดสอบการเดินระบบ												
8.เก็บตัวอย่างน้ำและวิเคราะห์ปุ๋ยที่ได้												
9.ทดสอบปุ๋ยกับแปลงเกษตรทดลอง												
10.ประชาสัมพันธ์ระบบ												
11.สรุปผลการดำเนินงาน												

5.2 การวิเคราะห์ทางด้านสิ่งแวดล้อม

น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบก๊าซชีวภาพมักมีธาตุอาหารอยู่เหลือสูง ทำให้บ่อบำบัดขั้นหลังมีสาหร่ายสีเขียวเกิดขึ้น การนำน้ำที่ผ่านการบำบัดมาผลิตปุ๋ยสตรูไวท์ทำให้ธาตุเหล่านี้มีค่าลดลง และทำให้น้ำที่ผ่านการบำบัดลดปัญหาเรื่องกลิ่นสาหร่าย และสีได้

สำหรับประเทศไทยเกษตรกรจำเป็นต้องใช้ปุ๋ยฟอสเฟตในแต่ละปีเป็นจำนวนมากสังเกตุได้จากปริมาณการนำเข้าปุ๋ยในแต่ละปี พืชที่จำเป็นต้องใช้ปุ๋ยฟอสเฟตล้วนแต่เป็นพืชที่สำคัญต่อเศรษฐกิจไทย โดยในปี 2557 มีปริมาณการนำเข้าปุ๋ยเคมีถึง 5,592,435 ตัน คิดเป็นมูลค่า 68,334 ล้านบาท โดยนำเข้าจากซาอุฯ (18.81%) รัสเซีย (13.26%) จีน (14.60%) กาตาร์ (6.87%) เกาหลีใต้ (6.42%) และอื่นๆ (40.05%) ขนาดของตลาดการขายปุ๋ยนั้นจำกัดอยู่ที่บริษัทใหญ่ ๆ ไม่กี่บริษัทตามตารางที่ 1 ซึ่งรวมกำลังการผลิตกว่า 4 ล้านตันต่อปี (พ.ศ. 2543) อย่างไรก็ตามมีผู้ประกอบการขนาดเล็กจำนวนมากที่ผลิตปุ๋ยเคมีผสม และปุ๋ยอินทรีย์เกิดขึ้นมากมายตามท้องถิ่นทั่วประเทศเนื่องจากรัฐบาลให้การสนับสนุน

ในอนาคตเชื่อว่าจะต้องมีการใช้ทั่งปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์อย่างผสมผสานกัน ตลาดของปุ๋ยเคมีในอนาคตจะมีค่าคงตัว แม้จะมีการสนับสนุนปุ๋ยคอก ปุ๋ยหมัก และปุ๋ยอินทรีย์มากขึ้นในประเทศไทยก็ตาม แต่เกษตรกรก็ยังคงใช้ปุ๋ยเคมี เพราะมีคุณสมบัติที่ให้ธาตุอาหารสูงและรวดเร็ว กว่าปุ๋ยอินทรีย์ และปุ๋ยอินทรีย์บางชนิดก็ต้องใช้แม่ปุ๋ยอินทรีย์ผสมเพื่อทำให้ความเข้มข้นของธาตุอาหารมีสูงขึ้น

กำลังการผลิตปุ๋ยของบริษัทขนาดใหญ่ในประเทศไทย

รายชื่อบริษัท	กำลังการผลิตปี 2543 (ตัน/ปี)	เงินลงทุน (ล้านบาท)	จำนวนคนงาน (คน)
1. บริษัท ไทยเซ็นทรัลเคมี จำกัด (มหาชน)	1,000,000	409	325
2. บริษัท ปุ๋ยไทย จำกัด	1,000,000	1,450	300
3.บริษัท ปุ๋ยแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	1,000,000	7,000	99
4. บริษัท เจียไต๋ จำกัด	300,000	25	108
5. บริษัท คาร์กิลส์สยาม จำกัด	300,000	135	35
6.อื่นๆ	400,000	N/A	N/A
รวมทั้งสิ้น	**4,000,000**	-	-

ที่มา: 1. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร

2. ศูนย์ข้อมูลอุตสาหกรรม สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม

5.2.2 **ตลาดเป้าหมาย**

a) กรณีขายปุ๋ย

ตลาดเป้าหมายมี 2 กลุ่มหลัก ๆ กลุ่มแรกเป็นกลุ่มเป้าหมายหลัก ก็คือ เกษตรกรที่ปลูกพืชชนิดต่าง ๆ ที่ต้องนำปุ๋ยฟอสเฟตไปใช้ในการเพาะปลูก หรือ ผู้ประกอบการผลิตปุ๋ยผสมสามารถจะนำปุ๋ยที่ผลิตได้ไปผสมเป็นปุ๋ยอื่น ๆ ตามต้องการได้

ตารางที่5-3 ราคาปุ๋ย

ปุ๋ยสูตร	ราคาต่อกระสอบ (50 กก)	ราคาต่อหน่วย (1 กก)	References
18-4-5	570-595	11.65	http://www.thansettakij.com/content/1656
14-4-9	570-595	11.65	
15-7-18	730-760	14.9	
21-0-0	400-410	8.1	
0-0-60	715-810	15.25	
15-15-15	820-990	18.1	
18-8-8	620	12.4	
Osmocote ปุ๋ยละลายช้า ออสโมโคท สูตร 6 เดือน 12-25-6+1% แม็กนีเซียม		399	Lazada
ปุ๋ยเคมีใส่ต้นแตงกวา 30-0-0 ตรา 5 นางฟ้าทรงฉัตร		179	
ตราหัววัว-คันไถ ปุ๋ยเคมี แพ็ค 5 ถุง สุดคุ้มสุดประหยัด สูตร 16-16-16 (5	480	96	

ปุ๋ยสูตร	ราคาต่อกระสอบ (50 กก)	ราคาต่อหน่วย (1 กก)	References
x 1 kg)			
ปุ๋ยเคมีใส่ต้นสละ 15-15-15 ตรา 5 นางฟ้าทรงฉัตร		179	
Golden Flower Organic Fertilizer Pellet ปุ๋ยอินทรีย์ชีวภาพอัดเม็ด เม็ดสีแดง 1กก.		199	
ไทยกรีนอะโกร หินฟอสเฟต (Rock Phosphate) 0-3-0		7.5	

b) กรณีขายเทคโนโลยีผลิตปุ๋ย

ส่วนเป้าหมายหลักอีกกลุ่มหนึ่ง คือ สถานประกอบการอื่น ๆ ที่ต้องการนำเทคโนโลยีไปใช้งาน โดยจะทำการขายเทคโนโลยีให้กับสถานประกอบการ เช่น โรงแป้งมันสำปะหลังอื่น ๆ ที่มีมากกว่า 70 โรง ทั่วประเทศ ในปัจจุบัน การใช้เทคโนโลยีดังกล่าวในประเทศไทยยังไม่มีการนำไปใช้จริงแม้จะมีการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการแล้วก็ตาม

ลูกค้ารายสำคัญ

1. เกษตรกร
2. สถานประกอบการผลิตปุ๋ยสูตรต่างๆ
3. สถานประกอบการอุตสาหกรรมการเกษตร

I **ส่วนแบ่งทางการตลาด**

รายชื่อคู่แข่งที่สำคัญ

บริษัท ไทยเซ็นทรัลเคมี จำกัด (มหาชน), บริษัท ไอ ซี พี เฟอทิไลเซอร์จำกัด สมมุติโรงแป้งผลิตน้ำเสียได้ 1,000 ลบ.ม.ต่อวันต่อโรงงาน และมีจำนวนโรงแป้งอยู่ 70 แห่งทั่วประเทศ ซึ่งนับเป็นกำลังการผลิตปุ๋ยขนาดประมาณ 6,000 ตันต่อปี ซึ่งคิดเป็น 0.15% ของปริมาณปุ๋ยที่ใช้ในประเทศไทย หรือ 1.2% ของ

ปริมาณปุ๋ยฟอสเฟตที่นำเข้าทั้งนี้ยังไม่รวมเกษตรอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพอื่น ๆ เช่น ปาล์ม ฟาร์มสุกร และน้ำเสียชุมชนอื่น ๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่าความต้องการปุ๋ยมีมหาศาล

II เงื่อนไขอุตสาหกรรม

เงื่อนไข	**แนวทาง**
การขึ้นทะเบียนปุ๋ย กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ได้กำหนดปุ๋ยเคมีมาตรฐาน ตามพระราชบัญญัติปุ๋ย พ.ศ. 2518 และมีการแก้ไขเพิ่มเติมในปี พ.ศ. 2550 โดยมีเนื้อหาพอสังเขปคือ ปุ๋ยเคมีแอมโมเนียมซัลเฟตและปุ๋ยเคมีซูเปอร์ฟอสเฟตต้องมีธาตุฟอสฟอรัสอยู่ในรูปของฟอสเฟตร้อยละ 20 ไม่มีการเติมสี ความชื้นไม่เกินร้อยละ 3 ของน้ำหนัก ปุ๋ยดับเบิ้ลซูเปอร์ฟอสเฟตและทริบเบิ้ลซูเปอร์ฟอสเฟตต้องมีฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตร้อยละ 40 และ 45 ของน้ำหนักปุ๋ยตามลำดับ และจะต้องมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 9 ของน้ำหนัก **การเคลื่อนย้ายของเสียจากโรงงาน** กฎกระทรวง ฉบับที่ 2 ตาม พ.ร.บ. โรงงาน พ.ศ. 2535 หมวด 4 การควบคุมการปล่อยของเสีย มลพิษ หรือสิ่งใดๆ ที่มีผลต่อ สิ่งแวดล้อม กำหนดไว้ดังนี้ ข้อ 13 การกำจัดขยะ สิ่งปฏิกูล และวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว (1) รักษาโรงงานให้สะอาด และมีที่รองรับ/ที่กำจัดขยะและสิ่งปฏิกูล (2) แยกเก็บของเสียซึ่งมีวัตถุมีพิษปนอยู่ ไว้ในที่รองรับที่เหมาะสมและมี ฝาปิดมิดชิด และต้องกำจัดสิ่งดังกล่าวด้วยวิธีการที่ปลอดภัย	- อาจจะกำหนดให้เป็นสารปรับปรุงดิน แทนการขึ้นทะเบียนปุ๋ย - พยายาขึ้นทะเบียนปุ๋ยให้ได้ - ขายตรงต่อผู้ผลิตปุ๋ย - ขึ้นกับว่าจะแสดงว่าเป็นผลผลิตหรือว่าเป็นของเสีย ในกรณีนี้ การผลิตสารปรับปรุงดินหรือปุ๋ย น่าจะสามารถแสดงได้ว่าเป็นผลผลิต โดยจะต้องทำการทดสอบคุณสมบัติด้านต่าง ๆ เช่นปริมาณสารปนเปื้อนอื่น ๆ - จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าปุ๋ยสตรู ไวท์มีส่วนประกอบโลหะหนักน้อยมาก คือ มีความบริสุทธิ์ที่สูงประกอบไปด้วยธาตุที่สำคัญต่อพืชเป็นหลัก

(3) โรงงานที่มีของเสีย ต้องดำเนินการกำจัดดังต่อไปนี้ (ก) ห้ามมิให้นำออกนอกบริเวณโรงงาน เว้นแต่จะได้รับอนุญาตจาก อรอ. หรือผู้ซึ่ง อรอ. มอบหมาย ตามหลักเกณฑ์และวิธีการที่กำหนด (ข) แจ้งรายละเอียดชนิด ปริมาณ คุณสมบัติและสถานที่เก็บ พร้อมวิธีการเก็บ ทำลายฤทธิ์ กำจัด ทิ้ ง ฝัง เคลื่อนย้ายและการขนส่ง ตามหลักเกณฑ์และวิธีการที่กำหนด	

c) กลยุทธ์ทางการตลาด

I การวิเคราะห์จุดแข็ง จุดอ่อน โอกาส และอุปสรรค (SWOT analysis)

ตารางที่ 5- การวิเคราะห์จุดแข็ง จุดอ่อน โอกาส และอุปสรรค

<u>จุดแข็ง (Strength; S)</u>	**<u>จุดอ่อน (Weakness; W)</u>**
1. ปุ๋ยผลิตได้ภายในประเทศ ลดการนำเข้า มีศักยภาพในการผลิตทั่วประเทศสูง 2. ใกล้แหล่งใช้งานเกษตรกรรม 3. ลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของโรงงาน 4. ส่งเสริม Circular Economy 5. เป็นปุ๋ยละลายช้าที่ประกอบไปด้วยธาตุอาหาร ที่หลากหลาย ได้แก่ธาตุอาหารหลัก คือ ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม และธาตุอาหารรองได้แก่ แมกนีเซียมและแคลเซียม ซึ่งปุ๋ยสามารถนำไปใช้กับพืชได้โดยตรง โดยจะทำให้ใช้ปุ๋ยในแปลงเพาะปลูกลดลงในระยะยาว 6. สามารถนำไปใช้เป็นแม่ปุ๋ยผสมกับสารอาหารอื่นๆ เพื่อใช้สำหรับพืชชนิดอื่นๆ ซึ่งเหมาะกับเกษตรกรที่ปลูกพืชหลายชนิดแตกต่างกัน ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการซื้อปุ๋ยหลายสูตร	1. ปริมาณและลักษณะของน้ำเสียในแต่ละวันที่ต่างกันทำให้ความเสถียรของคุณภาพปุ๋ยอาจจะไม่แน่นอน 2. การใช้สารเคมีในการปรับพีเอช ราคาผันผวน อาจจะทำให้ต้นทุนปุ๋ยสูงขึ้น 3. เป็นปุ๋ยที่มีสัดส่วนฟอสฟอรัสสูงกว่าธาตุอาหารอื่น ๆ จะทำให้ต้องผสมกับธาตุอื่น ๆ เพิ่มเติม ราคาจะสูงขึ้น 4. ปุ๋ยที่ได้อาจจะมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับดินบางชนิด เช่น ดินที่มีสภาพเป็นกรด 5. ปุ๋ยต้องตากแห้ง ซึ่งฤดูฝนจะทำได้ยาก จึงอาจจะต้องมีการใช้พลังงานอบ

<u>โอกาส (Opportunity; O)</u> 1. ด้วยวัสดุที่ผลิตได้ในประเทศ ปุ๋ยที่ได้สามารถนำไปผสมกับปุ๋ยชนิดอื่น ๆ เพื่อผลิตเป็นปุ๋ยอินทรีย์ หรือผลิตปุ๋ยเคมีอื่น ๆ 2. ปุ๋ยที่ได้อาจจะส่งเสริมขายออนไลน์ 3. ด้วยเทคโนโลยีการผลิตปุ๋ยดังกล่าว จะสามารถขยายผลไปในโรงงานเกษตรอุตสาหกรรม และฟาร์มปศุสัตว์ ทั่วประเทศได้ 4. โมเดลธุรกิจทำได้หลายแบบ เช่น ขายเทคโนโลยีให้กับโรงงานเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำ หรือ ขายปุ๋ยเพิ่มรายได้ของโรงงาน และเสริมสร้าง CSR 5. โรงงานแป้งมันสำปะหลังสามารถจัดการทรัพยากรอย่างเป็นระบบและได้มูลค่าสูงสุด	**<u>อุปสรรค (Threats; T)</u>** 1. ทัศนคติของเกษตรกรที่เวลาใช้ปุ๋ยจะใช้แบบซ้ำๆไม่นึกถึงคุณภาพดินและไม่เปิดใจปุ๋ยชนิดอื่นๆ แต่หากเกษตรกรได้รับคำแนะนำที่ถูกต้องก็จะสามารถแก้ไขอุปสรรคนี้ได้ 2. กฎหมายโรงงานอุตสาหกรรม 3. กฎหมายการขึ้นทะเบียนปุ๋ย (อาจจะใช้เป็นสารปรับปรุงดิน)

II การกำหนดกลยุทธ์ทางการตลาด

ด้านผลิตภัณฑ์ (Product)

ปุ๋ยจะถูกอัดเม็ดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 เซนติเมตรถูกบรรจุในถุงซึ่งมีขนาด 20, 50 และ 100 กิโลกรัม

ด้านราคา (Price)

ดำเนินการขายปุ๋ยที่กิโลกรัมละ 26 บาท

ด้านช่องทางจัดจำหน่าย (Place) แบ่งเป็น 2 อย่างคือ

1. ขายปุ๋ย
   - มีร้านค้าขายโดยตรง
   - ออนไลน์ ประกาศขายตาม อินเทอร์เน็ต Facebook เป็นต้น
   - ตัวแทนจำหน่ายร้านค้าปลีกตามจังหวัดต่างๆ ทีมงานขายที่จะเข้าถึงเกษตรกรโดยตรง
2. ขายเทคโนโลยี
   - ทีมงานขายที่จะสาธิตขั้นตอนดำเนินการตามสถานประกอบการ

การส่งเสริมการขาย (Promotion) ลงโฆษณาขายตามทีวี อินเทอร์เน็ต facebook และจะมีเพจ facebook ทีจะคอยให้คำปรึกษาแก่เกษตร มีคำแนะนำในการใช้ปุ๋ยไปผสมกับปุ๋ยชนิดอื่น ๆ เพื่อให้ได้ปุ๋ยที่เหมาะสมที่เกษตรแต่ละคนปลูก

d) สรุปผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

1. จุดคุ้มทุนของระบบบำบัดน้ำด้วยการเปลี่ยนธาตุสารอาหารเป็นปุ๋ยสตรูไวท์นั้น สามารถคิดได้จาก ๓ ส่วน คือ (๑) น้ำที่ได้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น ซึ่งจะทำให้พื้นที่ที่ใช้ในการบำบัดขั้นหลังลดลง (๒) ปุ๋ยที่ได้จากระบบนั้นสามารถนำมาขายเป็นปุ๋ยละลายช้า สร้างรายได้เพิ่มได้ (๓)

2. ต้นทุนของปุ๋ยสตรูไวท์ ยังสูง คือ มีราคาต้นทุนประมาณ ๑๒ บาทต่อกก ทั้งนี้การเดินระบบที่ได้จากงานวิจัยนี้ ไม่ได้ทดสอบการวนน้ำกลับมาใช้ใหม่ซึ่งจะทำให้ค่าต้นทุนสารเคมีลดลง

3. ตารางที่ แสดงการคำนวณจุดคุ้มทางของระบบต้นแบบขนาด ๓๐๐ กกต่อวัน ซึ่งเมื่อปุ๋ยที่ผลิตได้สามารถขายได้ที ราคา ๒๖ บาท จะทำให้สามารถคุ้มทุนได้ภายใน ๓ ปี

5.3 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสิ่งแวดล้อม

น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบก๊าซชีวภาพมักมีธาตุอาหารอยู่เหลือสูง ทำให้บ่อบำบัดขั้นหลังมีสาหร่ายสีเขียวเกิดขึ้น การนำน้ำที่ผ่านการบำบัดมาผลิตปุ๋ยสตรูไวท์ทำให้ธาตุเหล่านี้มีค่าลดลง และทำให้น้ำที่ผ่านการบำบัดลดปัญหาเรื่องกลิ่นสาหร่าย และสีได้

อย่างไรก็ตามน้ำที่ผ่านการบำบัดนั้นจะมีค่าพีเอชสูงถึง ๙ และ ๑๐ จำเป็นต้องมีการบำบัดขั้นหลังเพื่อให้มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำ ทำให้ค่าพีเอชลดลง

รูปที่ 5.8 ตัวอย่างน้ำเข้า น้ำออกจากถังที่ 1 น้ำออกจากถังที่ 2 และตะกอนของน้ำถังที่ 1 และ 2 หลังจากวางไว้สองอาทิตย์ พบว่าน้ำเสียที่ยังไม่ผ่านการบำบัดเปลี่ยนเป็นสีเขียวเนื่องจากการเติบโตของพืชน้ำ

บทที่ 6

สรุปและอภิปรายผล

6.1 การทดสอบระดับห้องปฏิบัติการ

จากการดำเนินงานศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อการตกผลึก MAP ของน้ำเสียที่ออกจากกระบวนการผลิตไบโอก๊าซ ของโรงงานแป้งมันสำปะหลังที่ได้รับความอนุเคราะห์จากโรงงาน ก. โดยปัจจัยที่ศึกษานั้นประกอบไปด้วย สมบัติของน้ำเสียที่นำมาบำบัด ค่าความเป็นกรดด่าง และ อัตราส่วนระหว่าง แมกนีเซียมต่อฟอสเฟต (Mg^{2+} : PO_4^{3-}) พบว่าปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อการตกตะกอน MAP นั้นส่งผลต่อการตกตะกอน MAP ดังนี้

6.1.1 สมบัติของน้ำเสีย

ก่อนที่จะทำการทดลองที่ 1 และ การทดลองที่ 2 เราจะนำน้ำเสียจากแต่ละแหล่งมาตรวจวัดสารอาหารต่างๆ เพื่อดูว่าน้ำเสียจากแหล่งไหนมีสารอาหารมากที่สุด จึงเหมาะแก่การนำมาตกตะกอน MAP โดยจะมีน้ำเสียจาก 4 โรงงาน ได้แก่ โรงงานแป้งมันสำปะหลังที่ตั้งอยู่ในจังหวัดชลบุรีและชัยภูมิ (ก. และ ข. ตามลำดับ) โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (ค.) และฟาร์มสุกร (ง.) สารอาหารที่เราสนใจหลักๆ ก็คือ แมกนีเซียม แอมโมเนีย ฟอสเฟต แคลเซียม ในแต่ละโรงงานมีสารอาหารดังต่อไปนี้

โรงงานแป้งมันสำปะหลังที่ตั้งอยู่ในจังหวัดชลบุรี (ก.) พบว่าน้ำที่ออกจากกระบวนการผลิตไบโอก๊าซมีสารอาหารที่เราสนใจมากที่ ได้แก่ แมกนีเซียม 800 mg/L แอมโมเนีย 182.98 mg/L ฟอสเฟต 202 mg/L

โรงงานแป้งมันสำปะหลังที่ตั้งอยู่ในจังหวัดชัยภูมิ พบว่าน้ำจากกากตะกอนมีสารอาหารที่เราสนใจมากที่ ได้แก่ แมกนีเซียม 265 mg/L แอมโมเนีย 131 mg/L ฟอสเฟต 61 mg/L

โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ตั้งอยู่ในจังหวัดชลบุรี (ค.) พบว่าน้ำจากกากตะกอนมีสารอาหารที่เราสนใจมากที่ ได้แก่ แมกนีเซียม 2500 mg/L แอมโมเนีย 112 mg/L ฟอสเฟต 137 mg/L

ฟาร์มสุกรที่ตั้งอยู่ในจังหวัดชลบุรี (ง.) พบว่า พบว่าน้ำจากการตะกอนมีสารอาหารที่เราสนใจมากที่ ได้แก่ แมกนีเซียม 279 mg/L แอมโมเนีย 450 mg/L ฟอสเฟต 700 mg/L

6.1.2 ผลกระทบของความเป็นกรดด่างที่มีผลต่อการตกตะกอน MAP

จากขั้นตอนการทดลองผู้ศึกษาได้ดำเนินการปรับค่าความเป็นกรดด่างที่ต่างกันทั้งหมด 6 ค่า ได้แก่ 7.06 , 8.05 , 9.01 , 10.01 , 11.01 และ 12.02 พบว่าค่าความเป็นกรดด่างที่มีผลต่อการตกตะกอน MAP มากที่สุดคือ 9.01 ส่งผลให้มีเปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสารอาหารต่างๆ ดังนี้

แมกนีเซียม (Mg^{2+})	77.78	%
แอมโมเนียม (NH_4^{+})	58.26	%
ฟอสเฟต (PO_4^{3-})	39.64	%
แคลเซียม (Ca^{2+})	77.78	%

6.1.3 ผลกระทบของอัตราส่วนระหว่าง Mg^{2+} : PO_4^{3-} ที่มีผลต่อการตกตะกอน MAP

จากขั้นตอนการทดลองผู้ศึกษาได้ดำเนินการปรับอัตราส่วนระหว่าง Mg^{2+} : PO_4^{3-} โดยจะปรับอัตราส่วนระหว่าง Mg^{2+} : PO_4^{3-} ทั้งหมด 3 อัตราส่วน ได้แก่ 1 : 1 , 1 : 2 และ 2 : 1 โดยทั้งพบว่า 3 อัตราส่วนนี้ จะใช้ความเป็นกรดด่างที่ได้จากการทดลองที่ 1 ซึ่งก็คือความเป็นกรดด่างเท่ากับ 9 อัตราส่วนระหว่าง Mg^{2+} : PO_4^{3-} ที่มีผลต่อการตกตะกอน MAP มากที่สุดคือ อัตราส่วน 1 : 2 ส่งผลให้มีเปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสารอาหารต่างๆ ดังนี้

แมกนีเซียม (Mg^{2+})	80	%
ฟอสเฟต (PO_4^{3-})	90	%
แคลเซียม (Ca^{2+})	9	%

6.1.4 การทดสอบแบบต่อเนื่อง

การเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสารอาหารต่างๆ ด้วยวิธีการตกตะกอน MAP สามารถทำได้โดยศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อการตกตะกอน MAP ซึ่งประกอบไปด้วย สมบัติของน้ำเสียที่จะนำมาตกตะกอน MAP ค่าความเป็นกรดด่าง และ อัตราส่วนระหว่าง แมกนีเซียมต่อฟอสเฟต (Mg^{2+} : PO_4^{3-}) จากการศึกษาพบว่าแหล่งน้ำที่เหมาะแก่การนำมาตกตะกอน MAP คือ น้ำเสียที่ออกจากกระบวนการผลิตไบโอก๊าซ และประสิทธิภาพการกำจัดสารอาหารต่างๆ จะเพิ่มสูงขึ้นหากเราควบคุมความเป็นกรดด่างของน้ำเสียให้อยู่ในช่วงระหว่าง 9-10 โดยเราสามารถควบคุมความเป็นกรดด่างได้ด้วยการเติมสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หากต้องการความเบส และเติมสารไฮโดรคลอริค (HCl) หากต้องความเป็นกรด เพื่อให้ได้ความ

เป็นกรดด่างอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการตกตะกอน MAP ในส่วนของอัตราส่วนระหว่าง แมกนีเซียมต่อฟอสเฟต (Mg^{2+} : PO_4^{3-}) สิ่งที่ส่งผลคือ ประสิทธิภาพการกำจัดสารอาหารต่างๆมีเพิ่มขึ้น ในอัตราส่วน 1 : 2 เราสามารถปรับอัตราส่วนของแมกนีเซียมได้โดยใช้สาร แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl) และปรับอัตราส่วนของฟอสเฟตได้โดยใช้สาร อลูมิเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\underline{AlH_6O_{12}P_3}$) และที่สำคัญจะต้องปรับความเป็นกรดด่างของน้ำเสียให้อยู่ในช่วงระหว่าง 9-10 เพื่อให้การกำจัดสารอาหารมีประสิทธิภาพสูงที่สุด

จากผลการเดินระบบต่อเนื่องพบผลกระทบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

พารามิเตอร์	**ผลและค่าที่เหมาะสม**
พีเอช	9-10 พีเอชมากตกผลึกปุ๋ยเยอะขึ้น อย่างไรก็ตามอาจจะไม่ใช่ปุ๋ยสตรูไวท์
ระยะเวลาทำปฏิกิริยา	30 นาที – 2 ชั่วโมง ทำปฏิกิริยานานก็จะได้ปุ๋ยมากขึ้น
อัตราส่วน Mg2+:PO43-	2:1 จะทำให้ลดฟอสเฟตได้มากกว่า 80%
การกวนสมบูรณ์	ทำให้ปฏิกิริยาการตกผลึกเกิดได้ดีขึ้น
การเติมอากาศ	ช่วยเพิ่มพีเอช แต่ตะกอนปุ๋ยน้อย

6.1.5 ระบบต้นแบบผลิตปุ๋ยสตรูไวท์ระดับโรงงาน

ผู้วิจัยได้ออกแบบและก่อสร้างระบบต้นแบบผลิตปุ๋ยที่ขนาดการผลิตมากกว่า 25 กกต่อวัน และได้เดินระบบเป็นระยะเวลาประมาณ 2 เดือน (จบการเดินระบบวันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2560 เนื่องจากโรงแป้งหยุดกระบวนการผลิตในช่วงฤดูหมดแป้งมัน และเพื่อปรับปรุงโรงงาน) จากการเดินระบบเป็นระยะเวลากว่า 2 เดือนสามารถสรุปผลได้ดังนี้

6.1.6 ผลสรุปทางเทคนิค

- เทคโนโลยีผลิตปุ๋ยสตรูไวท์จากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมและน้ำเสียฟาร์มปศุสัตว์ ทำได้ไม่ยาก มีขั้นตอนเทคนิคที่ไม่ยาก เพราะเป็นวิธีทางเคมี
- น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบก๊าซชีวภาพมีค่าระดับพีเอชที่เหมาะสม มีองค์ประกอบธาตุสารอาหาร คือ แมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสเฟตที่เหมาะสมสามารถนำมาผลิตเป็นปุ๋ยสตรูไวท์ได้
- จากการทดสอบพบว่า น้ำเสียจากโรงงานปาล์ม น้ำแป้งมันสำปะหลัง และฟาร์มสุกรสามารถนำมาผลิตปุ๋ยสตรูไวท์ได้ โดยมีศักยภาพการผลิตปุ๋ยดังนี้ คือ ตามลำดับ

- การควบคุมระบบสามารถทำโดยให้เดินระบบอัตโนมัติ ควบคุมค่าพีเอชและการเติมสารเคมีได้
- ปุ๋ยที่ได้จากการทดสอบเป็นปุ๋ย K-สตรูไวท์ มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ แมกนีเซียม ไนโตรเจต โปแทสเซียม และฟอสฟอรัส โดยสามารถนำไปปลูกพืชได้ และจากการทดสอบเทียบกับปุ๋ยเคมีชนิดอื่น ๆ พบว่าปุ๋ยสตรูไวท์ที่ผลิตได้ เป็นปุ๋ยละลายช้า และมีค่าฟอสเฟตเทียบเท่ากับค่าฟอสเฟตที่ปล่อยออกมาจากปุ๋ยที่ขายตามท้องตลาด
- ปุ๋ยที่ได้ต้องมีการตากแห้ง ฉะนั้นในฤดูฝนอาจจะมีปัญหาไม่สามารถตากตะกอนให้แห้งได้
- น้ำเสียที่ผ่านระบบบำบัดอาจจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันทำให้ปุ๋ยที่ได้มีคุณภาพที่แตกต่างกัน
- โรงงานไม่ได้มีการโม่มันตลอดปี ทำให้ไม่ได้มีน้ำเสียตลอดปี แต่ก็สามารถผลิตปุ๋ยได้ทันที ไม่ต้องมีการสตาร์ทอัป เหมือนระบบก๊าซชีวภาพ

6.1.7 ผลสรุปทางเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม

- จุดคุ้มทุนของระบบบำบัดน้ำด้วยการเปลี่ยนธาตุสารอาหารเป็นปุ๋ยสตรูไวท์นั้น สามารถคิดได้จาก

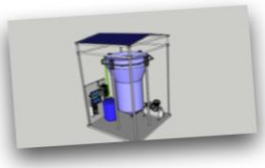
  (1) น้ำที่ผ่านระบบผลิตปุ๋ยสตรูไวท์มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น ซึ่งจะทำให้พื้นที่ที่ใช้ในการบำบัดขั้นหลังลดลง และในกรณีที่โรงงานต้องการเพิ่มกำลังการผลิตแป้ง และน้ำเสียมีปริมาณและคุณภาพความเข้มข้นที่สูงขึ้น การก่อสร้างระบบผลิตปุ๋ยสตรูไวท์จะทำให้โรงงานสามารถรองรับผลกระทบของน้ำเสียที่มีคุณภาพเข้มข้นขึ้น ในพื้นที่ที่จำกัดได้ดีขึ้น

  (2) ปุ๋ยที่ได้จากระบบนั้นสามารถนำมาขายเป็นปุ๋ยละลายช้า สร้างรายได้เพิ่มได้ ซึ่ง ณ ปัจจุบันด้วยกฎหมายโรงงานทำให้การเคลื่อนย้าย by-product แต่ละส่วนออกจากโรงงานนั้นทำได้ยาก จึงมีความคิดว่าถ้าสามารถนำสิ่งเหล่านี้มาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ปุ๋ย ก็จะสามารถสร้างเป็นรายได้และเกิดเป็นโรงาน Zero-waste ได้
- ต้นทุนของปุ๋ยสตรูไวท์ ยังสูง คือ มีราคาต้นทุนประมาณ ๑๒ บาทต่อกก ทั้งนี้การเดินระบบที่ได้จากงานวิจัยนี้ ไม่ได้ทดสอบการวนน้ำกลับมาใช้ใหม่ซึ่งจะทำให้ค่าต้นทุนสารเคมีลดลง
- ตารางที่ แสดงการคำนวณจุดคุ้มทางของระบบต้นแบบขนาด 300 กกต่อวัน ซึ่งเมื่อปุ๋ยที่ผลิตได้สามารถขายได้ที่ราคา 26 บาท จะทำให้สามารถคุ้มทุนได้ภายใน 3 ปี
- น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบก๊าซชีวภาพมักมีธาตุอาหารอยู่เหลือสูง ทำให้บ่อบำบัดขั้นหลังมีสาหร่ายสีเขียวเกิดขึ้น การนำน้ำที่ผ่านการบำบัดมาผลิตปุ๋ยสตรูไวท์ทำให้ธาตุเหล่านี้มีค่าลดลง และทำให้น้ำที่ผ่านการบำบัดลดปัญหาเรื่องกลิ่นสาหร่าย และสีได้
- อย่างไรก็ตามน้ำที่ผ่านการบำบัดนั้นจะมีค่าพีเอชสูงถึง ๙ และ ๑๐ จำเป็นต้องมีการบำบัดขั้นหลังเพื่อให้มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำ ทำให้ค่าพีเอชลดลง

6.2 ผลผลิต

- นำเสนอคูปองนวัตกรรมสำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ เข้ารอบรับคูปอง รวมทั้งได้รับความสนใจจากผู้ประกอบการ มีผู้เข้าร่วมประชุมประมาณ ๒๐ คน

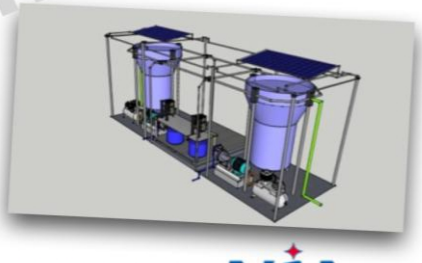
innovation: making Creativity into value Reality



SF+

(Struvite Fertilizer for a Sustainable Future)

Confidential



สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ NIA National Innovation Agency

- เข้ารอบรองชนะเลิศประกวดรางวัลนวัตรกรรมแห่งชาติ พ.ศ. ๒๕๖๐ สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ ซึ่งได้รับการเผยแพร่ในงานแสดง โดยมีผู้เข้าร่วมงานมาสอบถามกว่า ๓๐ คน

สมาคมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์
กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ
สภาสมาคมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ
ขอมอบเกียรติบัตรนี้เพื่อแสดงว่า
นางสาวพลอยไพลิน นำภา นางสาวดวงรัตน์ พลศรี และ นางสาววิรัลพัชร สิงห์รักษ์พล เจ้าของผลงาน
ดร.รอบรู้ รังสิเวค อาจารย์ที่ปรึกษา
มหาวิทยาลัยบูรพา
มีผลงานเรื่อง Struvite Fertilizer for the Sustainable Future (SFSF)
ผ่านการคัดเลือกเข้ารอบรองชนะเลิศ ในการประกวดรางวัลนวัตกรรมแห่งประเทศไทย ครั้งที่ ๑๙ (พ.ศ.๒๕๖๐)
วันที่ ๑๙ – ๒๐ สิงหาคม พ.ศ. ๒๕๖๐
ให้ไว้ ณ วันที่ ๒๐ สิงหาคม พ.ศ. ๒๕๖๐

(รองศาสตราจารย์ ดร.อุทุมพร พลาวงศ์)
ประธานโครงการรางวัลนวัตกรรม
แห่งประเทศไทย

(รองศาสตราจารย์ ดร.นภาวรรณ นพรัตนราภรณ์)
นายกสมาคมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย
ในพระบรมราชูปถัมภ์

สมาคมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์
THE SCIENCE SOCIETY OF THAILAND UNDER THE PATRONAGE OF HIS MAJESTY THE KING
สำนักงาน : คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330 โทร 0-2218-5245, 0-2252-7987 โทรสาร 0-2252-7987
Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand. Tel. 0-2218-5245, 0-2252-7987 Fax : 0-2252-7987
E-mail : scisoc.thailand@gmail.com Homepage : http://www.scisoc.or.th

ที่ สวท.107/2560

7 มิถุนายน 2560

เรื่อง ขอเชิญชวนนิทรรศการและนำเสนอผลงานในการประกวดรางวัลนวัตกรรมแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17 (พ.ศ.2560)

เรียน คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยบูรพา

สิ่งที่ส่งมาด้วย 1. แบบตอบรับ
2. กำหนดการ

ตามที่ หน่วยงานของท่านได้กรุณาให้ความสนใจส่งผลงานเข้าร่วมประกวดรางวัลนวัตกรรมแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 (พ.ศ.2560) นั้น คณะกรรมการฯ ได้พิจารณาและคัดเลือกให้โครงงานเรื่อง " Sirasvita Fertilizer for the Sustainable Future (SFSF) " ซึ่งมี นางสาวพลอยไพลิน นันทา, นางสาวดวงรัตน์ หอศรี, นางสาววิรัลพัชร ยิ่งพัฒน์พล เป็นเจ้าของผลงาน และมี ดร.ชยธรู รังสิวงศ เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา เข้าร่วมจัดนิทรรศการและนำเสนอผลงานในการประกวดรางวัลนวัตกรรมฯ ระหว่างวันที่ 19-20 มิถุนายน 2560 ณ ศูนย์แสดงสินค้าและการประชุม อิมแพ็ค เมืองทองธานี โดยสมาคมฯ จะรับผิดชอบค่าใช้จ่ายในการนำผลงานมาประกวดรางวัลนวัตกรรมฯ เหมาจ่ายต่อทีม จำนวนเงิน 4,000 บาท (สี่พันบาทถ้วน)

จึงเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณาดำเนินการ ให้นักศึกษาและอาจารย์เข้าร่วมกิจกรรม ข้างต้น ตามวัน เวลา และสถานที่ ดังกล่าวและกรุณาส่งแบบตอบรับทาง e-mail:scisoc.thailand@gmail.com หรือทางโทรสาร 02-252-4516 ภายในวันอังคารที่ 15 มิถุนายน พ.ศ.2560 จักขอบคุณยิ่ง

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์ ดร.อุทุมพร พลางค์)
ผู้ปฏิบัติการแทนสมาคมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทยฯ และ
ประธานโครงการรางวัลนวัตกรรมแห่งประเทศไทย

ผู้ประสานงาน : นางอุดมลักษณ์ แสวงธรรม โทรศัพท์ 02-218-5245, 02-252-7987 โทรสาร 02-252-4516
นายอุทธพล พากาก โทรศัพท์ 061-868-4004

กำหนดการ

การประกวดรางวัลนวัตกรรมแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17 (พ.ศ.2560)

ระหว่างวันที่ 19-20 สิงหาคม 2560

ณ Hall 7 ศูนย์แสดงสินค้าและการประชุม อิมแพ็ค เมืองทองธานี

วันเสาร์ที่ 19 สิงหาคม 2560

เวลา	*10.00 - 10.30 น.*	*ลงทะเบียน ณ Hall 7 ศูนย์แสดงสินค้าและการประชุม อิมแพ็ค เมืองทองธานี*
	10.30 - 12.00 น.	นำเสนอผลงานประจำบูธ
	12.00 - 13.00 น.	พักรับประทานอาหารกลางวันตามอัธยาศัย
	13.00 - 16.30 น.	นำเสนอผลงานต่อคณะกรรมการ
		สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และนวัตกรรมสังคม
		ห้อง Phoenix 3
		สาขานวัตกรรมกิจกรรมทางกายและกีฬาเพื่อสุขภาพ
		ห้อง Phoenix 4

วันอาทิตย์ที่ 20 สิงหาคม 2560

เวลา	*09.30 - 12.00 น.*	*ผู้นำเสนอประจำที่จัดแสดงผลงาน*
		รอการตัดสินจากคณะกรรมการ
	12.00 - 13.00 น.	พักรับประทานอาหารกลางวันตามอัธยาศัย
	13.00 - 14.30 น.	ผู้นำเสนอประจำที่ที่จัดแสดงผลงาน(ต่อ)
	14.30 น.	ประกาศผล การประกวดรางวัลนวัตกรรมที่เข้าร่วมระดับประเทศ

หมายเหตุ รายการอุปกรณ์ที่ต้องเตรียมมาตอนประกวด

1. เข้าติดตั้งบูธได้ วันที่ 19 สิงหาคม 2560 เวลา 8.00-10.00 น. เท่านั้น
2. โปสเตอร์ขนาด 80X100 ซม. ติดตั้ง ณ Hall 7 ศูนย์แสดงสินค้าและการประชุม อิมแพ็ค เมืองทองธานี (แต่ละผลงานสามารถติดโปสเตอร์ได้ 1 แผ่น)
3. ชิ้นงานที่เสร็จสมบูรณ์ (ชิ้นงานขนาดใหญ่ต้องมีวิธีตั้งพื้น)
4. ไฟล์ที่ใช้ทำโปสเตอร์ 1 ไฟล์ ลงแผ่น CD เพื่อรวบรวมทำหนังสือ (ส่งสัปดาห์ฯ วันที่ลงทะเบียน)
5. สำเนาบัตรประชาชน อาจารย์และนักเรียน คนละ 1 ชุด (ส่งสัปดาห์ฯ วันที่ลงทะเบียน)
6. ที่พักจัดหาเอง แนะนำ โรงแรม Jumbotal Bangkok โทรศัพท์ 02-573-1240, 02-574-1006

โปสเตอร์ที่ใช้ในการนำเสนอในงานนวัตกรรมแห่งชาติ

- จัดสัมนาเผยแพร่องค์ความรู้แก่ผู้ประกอบการ ๒๐ คน ไม่มีการดูงานสถานที่จริง เพราะโรงงานอยู่ในระหว่างการซ่อมแซมปรับปรุงไม่พร้อมต้อนรับ

๑๔ กันยายน ๒๕๖๐

เรื่อง ขอเชิญเข้าร่วมอบรมในหัวข้อเรื่อง “การผลิตปุ๋ย Struvite จากน้ำเสียโรงงานเกษตรอุตสาหกรรมและฟาร์มปศุสัตว์ในประเทศไทย”

เรียน ผู้ประกอบการ

เนื่องด้วยกระผม ดร. รอบรู้ รังสิเวค อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยบูรพา ได้รับทุนสนับสนุนงบประมาณจากสำนักงานวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ ๒๕๖๐ และได้ดำรงตำแหน่งหัวหน้าโครงการในหัวข้อโครงการวิจัยเรื่อง “การผลิตปุ๋ยฟอสเฟต (สตรูไวท์) จากน้ำเสียโรงงานเกษตรอุตสาหกรรมและฟาร์มปศุสัตว์ในประเทศไทย” ซึ่งมีจุดประสงค์ที่จะนำธาตุอาหารที่เหลืออยู่ในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบก๊าซชีวภาพแล้ว มาผลิตเป็นปุ๋ยฟอสเฟตละลายช้า บัดนี้งานวิจัยดังกล่าวได้ดำเนินงานแล้วเสร็จ ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่การวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการ ไปจนถึงการเดินระบบต้นแบบ ขนาดกำลังการผลิต 40 กิโลกรัมต่อวัน

คณะผู้วิจัยจึงได้จัดทำการอบรมเผยแพร่องค์ความรู้ของงานวิจัยในหัวข้อดังกล่าว ซึ่งมีการจัดอบรม ในวันที่ ๒๓ กันยายน พ.ศ. ๒๕๖๐ ณ ห้องประชุม Oriental Palm 1 โรงแรมจอมเทียนปาล์มบีช รีสอร์ท

จึงใคร่ขอเรียนเชิญท่านผู้ประกอบการที่มีความสนใจในการเข้าร่วมอบรมหัวข้อ “การผลิตปุ๋ย Struvite จากน้ำเสียโรงงานเกษตรอุตสาหกรรมและฟาร์มปศุสัตว์ในประเทศไทย” สำหรับท่านที่ต้องการนำน้ำเสียจากสถานประกอบการของท่านมาผลิตปุ๋ย Struvite เพื่อก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อสถานประกอบการ โดยมีแผนการอบรมดังเอกสารแนบและไม่เสียค่าใช้จ่าย

ท่านสามารถยืนยันการเข้าร่วมอบรมได้ที่อีเมล์ k.khanthong101@gmail.com หรือโทร ๐๘๕-๑๖๙-๗๒๓๔หากต้องการสอบถามข้อมูลเพิ่มเติมกรุณาติดต่อได้ที่อีเมล์ ropru@eng.buu.ac.th หรือโทร ๐๙๒-๙๓๙-๙๖๗๒

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(ดร.รอบรู้ รังสิเวค)
หัวหน้าโครงการ

กำหนดการ

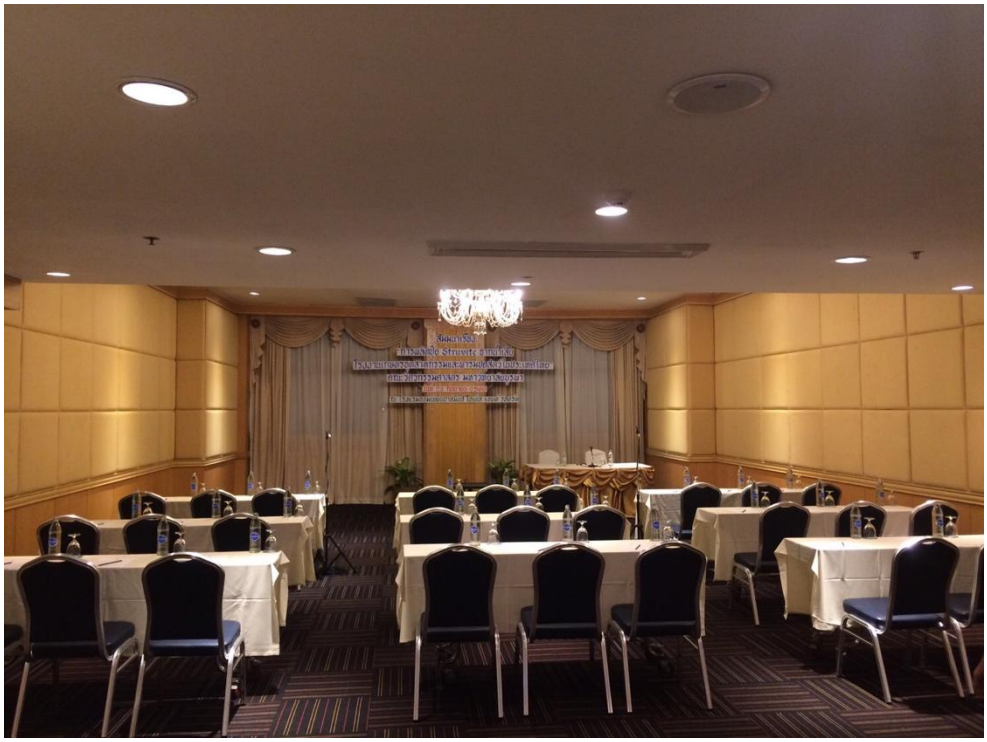
โครงการอบรมในหัวข้อเรื่อง “การผลิตปุ๋ย Struvite จากโรงงานเกษตรอุตสาหกรรมและฟาร์มปศุสัตว์ในประเทศไทย”

วันเสาร์ที่ ๒๓ กันยายน พ.ศ. ๒๕๖๐

ณ ห้องประชุม Oriental Palm 1 โรงแรมจอมเทียนปาล์มบีช รีสอร์ท

เวลา	กำหนดการ
๐๘.๓๐ - ๐๙.๐๐ น.	ลงทะเบียนเข้าร่วมการอบรม
๐๙.๐๐ - ๐๙.๑๐ น.	กล่าวเปิดงาน
๐๙.๑๐ - ๐๙.๔๕ น.	การบรรยายในหัวข้อเรื่อง "การศึกษาวิจัยการผลิตปุ๋ยฟอสเฟต Struvite จากน้ำเสียโรงงานเกษตรอุตสาหกรรม” น.ส. พลอยไพลิน นำภา
๐๙.๔๕ - ๑๐.๐๐ น.	พักรับประทานอาหารว่างและเครื่องดื่ม
๑๐.๐๐ - ๑๐.๓๐ น.	การบรรยายในหัวข้อเรื่อง “ความเป็นไปได้ทางเทคนิค เศรษฐศาสตร์ และทางสิ่งแวดล้อมในการผลิตปุ๋ย Struvite จากโรงงานเกษตรอุตสาหกรรมและฟาร์มปศุสัตว์ในประเทศไทย” และ ชมวีดีโอระบบต้นแบบผลิตปุ๋ย Struvite กำลังการผลิต 40 กิโลกรัมต่อวัน โดย ดร.รอบรู้ รังสิเวค
๑๐.๓๐ - ๑๑.๐๐ น.	เปิดโอกาสให้ผู้ประกอบการได้มีการซักถามในข้อสงสัย และแลกเปลี่ยนความคิดเห็น
๑๑.๐๐ - ๑๒.๐๐ น.	พักกลางวัน ร่วมรับประทานอาหารพร้อมกัน ณ ห้อง **Oriental palm 2**

ตัวอย่างถังปฏิกรณ์ผลิตปุ๋ยต้นแบบ



สัมมนาเรื่อง
"การผลิตปุ๋ย Struvite จากน้ำเสีย
โรงงานแกษตรอุตสาหกรรมและฟาร์มปศุสัตว์ในประเทศไทย"
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

รายชื่อผู้เข้าร่วมสัมมนา

ในหัวข้อ "การผลิตปุ๋ย Struvite จากโรงงานเกษตรอุตสาหกรรมและฟาร์มปศุสัตว์ในประเทศไทย"

ลำดับที่	หน่วยงาน	ชื่อ - สกุล	ลายเซ็นต์
1	ห้างหุ้นส่วนจำกัด สหมิตรแป้งมันชลบุรี	นายศรันพงศ์ ทองทิตต์เจริญ	
2	โรงงานสงวนวงษ์	นางสุกัญญา ปราบโรค	
3	โรงงานสงวนวงษ์	นายธนพงษ์ พันธ์ทองหลาง	
4	โรงงานสงวนวงษ์	นายธีระศักดิ์ แมบจันทึก	
5	บริษัท เซาวน์ดีสตาร์ช	นายขจร ลอยมา	
6	บริษัท เซาวน์ดีสตาร์ช	นางสาวศิริมา นันทพลชัย	
7	บริษัท เซาวน์ดีสตาร์ช	นายสุรเชษฐ์ กล้าณรงค์	
8	บริษัท ไทยเทครอน คอร์เปอร์เรชั่น	นายณัฏฐ์ธน สารทจีนพงษ์	
9	บริษัท อี.จี.จี.เอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด	นางสาวอารีรัตน์ ศุภสิริสมบัติ	
10	บริษัท อี.จี.จี.เอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด	นางสาวกัญญา ทวีโชคทองกุล	
11	บริษัท อี.จี.จี.เอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด	นางสาวสุนิดา แก้วถิ่นดง	
12	บริษัท อี.จี.จี.เอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด	นายอาทิตย์ โอว์	
13	บริษัท ยู-พ้อยท์ จำกัด	นายศรุต	
14	บริษัท ไทย อิสเทิร์น ไบโอ พาวเวอร์ จำกัด	นายคธายุทธ หอมจันทร์	
15	ผู้สนใจ	นายณรงค์เดช วิเศษ	
16	โรงงานโฮ่กี่	นางสาวอธิจิต สุวรรณธนาศิลป์	
17	โรงงานโฮ่กี่	นายภาสิน งามปานเหล	
18	โรงงานโฮ่กี่	นาย ชัยสิทธิ์ มุฬหิรัณพสมัย	
19	โรงงานโฮ่กี่		

นายสุดเสียง ทองทิตต์เจริญ

ภาคผนวก ก.

รูปภาพ

เก็บน้ำเสียที่โรงงานผลิตมันสำปะหลัง จังหวัดชลบุรี

เก็บน้ำเสียก่อนเข้าไบโอแก๊ส

บริเวณบ่อน้ำเสียก่อนเข้าไบโอแก๊ส

บ่อพักน้ำสุดท้าย นำน้ำเสียที่เก็บมา

มาเก็บไว้ในความเย็น

เก็บน้ำเสียที่โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม จังหวัดชลบุรี

เจ้าหน้าที่อธิบายถึงกระบวนการผลิตภายในโรงงาน

สอบถามข้อมูลการใช้น้ำภายในโรงงาน

เก็บน้ำเสียก่อนเข้าไบโอแก๊ส

บันทึกข้อมูลของน้ำเสีย

เก็บน้ำเสียที่ออกจากไบโอแก๊ส

เก็บน้ำเสียที่ฟาร์มสุกร จังหวัดชลบุรี

ภาคผนวก ข.

การคำนวณ

คำนวณตะกอน MAP

จากการทดลองที่ 2 เมื่อทำการวัดสารอาหารในน้ำเสียพบว่าน้ำเสียประกอบด้วย

แมกนีเซียมไอออน(Mg^{2+}) = 45 mg/L

- Mg^{2+} เท่ากับ 45 $\frac{mg}{L} \times \frac{1\ mol}{24.30\ g}$ =1.85 mmol/L

แอมโมเนียมไอออน(NH_4^+)เฉลี่ย = 311.43 mg/L

- NH_4^+ เท่ากับ 311.43 $\frac{mg}{L} \times \frac{1\ mol}{18\ g}$ = 17.3 mmol/L

ฟอสเฟตไอออน(PO_4^{3-})เฉลี่ย 144.14 mg/L

- PO_4^{3-} เท่ากับ 114.14 $\frac{mg}{L} \times \frac{1\ mol}{94.97\ g}$ = 1.20 mmol/L

ดังนั้น PO_4^{3-} จึงเป็นสารกำหนดปริมาณ(Limiting Reagent) MAP ซึ่งมีสูตรโมเลกุล $MgNH_4PO_4$(Mw 137.27 g/mol) จึงสามารถตกผลึกได้สูงสุดเท่ากับ 1.20 mmol/L

คิดเป็น $MgNH_4PO_4$ เท่ากับ 1.20 $\frac{mmol}{L} \times \frac{137.27\ g}{1\ mol}$ x 0.5 L = 82.36 mg

วิธีการเตรียมสารละลายที่ใช้ในการทดลอง

- **การเตรียมน้ำตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดลองอัตราส่วน**

1. เตรียมน้ำเสียที่มีอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออนต่อฟอสเฟตไอออน (Mg^{2+}:PO_4^{3-}) เท่ากับ 1:1

- **วัดความเข้มข้นของ Mg^{2+} ในน้ำเสียพบว่ามี Mg^{2+} 50 mg/L**

น้ำหนักโมเลกุล(Mw) Mg^{2+} เท่ากับ 24.30 g/mol

Mg^{2+} คิดเป็น 50 $\frac{mg}{L} \times \frac{1\ mol}{24.30\ g}$ = 2.06 mmol/L

- **วัดความเข้มข้นของ PO_4^{3-} ในน้ำเสียพบว่ามี PO_4^{3-} 180 mg/L**

น้ำหนักโมเลกุล(Mw) PO_4^{3-} เท่ากับ 94.97 g/mol

PO_4^{3-} คิดเป็น $180\ \frac{mg}{L} \times \frac{1\ mol}{94.97\ g} = 1.90$ mmol/L

ดังนั้นจึงต้องเติม PO_4^{3-} จำนวน 2.06 – 1.90 = 0.16 mmol/L

PO_4^{3-} $0.16\ \frac{mmol}{L} \times \frac{94.97\ g}{1\ mol}$ x 0.5 L = 7.60 mg

ใช้ $NH_4H_2PO_4$ มวลโมเลกุล 115.03 g/mol

$\frac{115.03\ g\ NH_4H_2PO_4}{94.97\ g\ PO_4^{3-}}$ x 7.60 mg PO_4^{3-} = 8.93 mg $NH_4H_2PO_4$

ต้องชั่ง $NH_4H_2PO_4$ 8.93 mg ต่อน้ำ 500 ml

ที่อัตราส่วน 1:1 สารกำหนดปริมาณคือ Mg^{2+} ดังนั้นจึงสามารถเกิด MAP ได้สูงสุดคือ 2.06 mg/L

$MgNH_4PO_4$ เท่ากับ $2.06\ \frac{mmol}{L} \times \frac{137.27\ g}{1\ mol}$ x 0.5 L = 141.39 mg

2. **เตรียมน้ำเสียที่มีอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออนต่อฟอสเฟตไอออน (Mg^{2+}:PO_4^{3-}) เท่ากับ 1:2**

วัดความเข้มข้นของ Mg^{2+} ในน้ำเสียพบว่ามี Mg^{2+} 2.06 mmol/L

วัดความเข้มข้นของ PO_4^{3-} ในน้ำเสียพบว่ามี PO_4^{3-} 1.90 mmol/L

ต้องการความเข้มข้นของ PO_4^{3-} เป็นสองเท่าของ Mg^{2+} คือ 4.12 mmol/L

ดังนั้นจึงต้องเติม PO_4^{3-} จำนวน 4.12 – 1.90 = 2.22 mmol/L

PO_4^{3-} $2.22\ \frac{mmol}{L} \times \frac{94.97\ g}{1\ mol}$ x 0.5 L = 105.42 mg

ใช้ $NH_4H_2PO_4$ มวลโมเลกุล 115.03 g/mol

$\frac{115.03\ g\ NH_4H_2PO_4}{94.97\ g\ PO_4^{3-}}$ x 105.42 mg PO_4^{3-} = 123.82 mg NH_4H_2PO4

ต้องชั่ง $NH_4H_2PO_4$ 123.82 mg ต่อน้ำ 500 ml

3. **เตรียมน้ำเสียที่มีอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออนต่อฟอสเฟตไอออน (Mg^{2+}:PO_4^{3-}) เท่ากับ 2:1**

วัดความเข้มข้นของ Mg^{2+} ในน้ำเสียพบว่ามี Mg^{2+} 2.06 mmol/L

วัดความเข้มข้นของ PO_4^{3-} ในน้ำเสียพบว่ามี PO_4^{3-} 1.90 mmol/L

ต้องการความเข้มข้นของ Mg^{2+} เป็นสองเท่าของ PO_4^{3-} คือ 3.80 mmol/L

ดังนั้นจึงต้องเติม Mg^{2+} จำนวน 3.80 – 2.06 = 1.74 mmol/L

$$Mg^{2+}\ 1.74\ \frac{\text{mmol}}{\text{L}} \times \frac{24.30\ \text{g}}{1\ \text{mol}} \text{ x } 0.5\ \text{L} = 21.14\ \text{mg}$$

ใช้ $MgCl_2{\cdot}H_2O$ มวลโมเลกุล 113.23 g/mol

$$\frac{113.23\ \text{g}\ MgCl_2H_2O}{24.30\ \text{g}\ Mg^{2+}} \text{ x } 21.14\ \text{mg}\ Mg^{2+} = 98.51\ \text{mg}\ MgCl_2H_2O$$

ต้องชั่ง $MgCl{\cdot}H_2O$ 98.51 mg ต่อน้ำ 500 ml

ที่อัตราส่วน 2:1 สารกำหนดปริมาณคือ PO_4^{3-} ดังนั้นจึงสามารถเกิด MAP ได้สูงสุดคือ 1.90 mg/L

$MgNH_4PO_{\$}$ เท่ากับ 1.90 $\frac{\text{mmol}}{\text{L}} \times \frac{137.27\ \text{g}}{1\ \text{mol}}$ x 0.5 L = 130.41 mg

ภาคผนวก ค.

ตารางที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ ค.1 pH และสารที่เหมาะสมที่ใช้ในการตกตะกอน

ไอออนของโลหะ	pH	สารที่ใช้ตกตะกอน
Si(IV)	< 1	กรดมินเนอราลเข้มข้น
Sn(IV), Sb(V)	< 1	กรด $HClO_4$ หรือ HNO_3 เข้มข้น
Pb(IV), Mn(IV)	< 1	กรดที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่เข้มข้น
Ce(IV), Ti(IV)	2 – 3	สารละลายเจือจางของกรดมินเนอราล
Sb(III), Bi(III)	2 – 3	ตกตะกอนในรูปของเกลือเบส (Basic Salt) SbOCl, BiOCl
Th(IV), Fe(III), Sn(II)	3 – 4	บัฟเฟอร์สารละลายให้มี pH 3 – 5 ด้วยบัฟเฟอร์อะซิติกขอะซิเดต หรือเบนโซอิก-เบนโซเอต
AI(III), Be(II), Cr(III)	5 – 6	ทำให้สารละลายมี pH 6 – 8 ด้วยสารละลายแขวนลอยของ ZnO, HgO, $CdCO_3$ หรือ $BaCO_3$
Cd(II),Co(II), Ni(II), Zn(II), Mn(II), Ag(I)	7 – 8	ทำให้สารละลายมี pH 8 –108 ด้วยแอมโมเนีย หรือสารแขวนลอยของ MgO
Mg(II)	11	NaOH
Ca(II), Sr(II), Ba(II)	> 12	ตกตะกอนได้แต่ไม่สมบูรณ์เมื่อใช้ NaOH

ที่มา : http://e-book.ram.edu/e-book/c/CM334/CM334-1.pdf

ตารางที่ ค.2 สมบัติของน้ำเสียของโรงงาน ก. และ ข.

	โรงงาน ก. Sludge	โรงงาน ก. Outlet biogas	โรงงาน ก. post treatment	โรงงาน ข. Sludge	โรงงาน ข. Outlet biogas	โรงงาน ข. post treatment
pH	7.1	7.2	7.8	7.1	6.9	7.9
BOD5	10000	8600	120	580	480	220
COD	35600	22400	318	1020	1040	618
COD_s	143	123	100	410	173	110
TS	64600	56250	1860	2310	2430	2110
TSS	59900	55300	233	575	910	440
VS	33800	20250	246	694	926	414
VSS	30400	18000	213	515	760	402
O&G	890	320	17	32	56	11
TKN	981	872	139	166	262	127
Amonia	73	172	112	131	22	68
Ca^{2+}	550	350	80	75	88	70
Mg^{2+}	800	650	280	265	252	210
K^{+}	1530	1190	693	657	562	626
Alkalinity	2020	2000	1240	1190	1240	1050
SO_4^{2-}	161	27.6			2.57	
PO_4^{3-}	196	202	36	61	59	49
VFA	662	720	214	136	136	117

หมายเหตุ : ทุกค่ามีหน่วย mg/L ยกเว้น pH

ตารางที่ ค.3 สมบัติของน้ำเสียจากโรงงาน ค. และ ง.

	โรงงาน ค. Outlet biogas	โรงงาน ค. Post treatment	โรงงาน ค. Sludg	โรงงาน ง. Outlet biogas	โรงงาน ง. Post treatment	โรงงาน ง. Sludg
pH	7.4	8	-	-	-	-
BOD5	2400	1000	-	3,200	1,400	46
COD	5500	2438	-	8,440	2,280	110
CODs	1500	1330	-	6,810	4,440	942
TS	14100	7250	-	5,330	920	22
TSS	5270	1160	-	3,920	2,500	218
VS	6120	2070	-	3,870	840	20
VSS	4300	970	-	934	416	4.8
O&G	295	87	-	364	258	8
TKN	476	164	-	177	196	7
Amonia	112	70	-	450	200	56
Ca2+	650	450	-	517	267	134
Mg2+	2500	1750	-	279	278	210
K+	2590	2410	-	2,400	2,100	500
Alk	5700	3500	-	4.53	6.78	
SO42-	9.96	30.5	-	123	97	22
PO43-	137	42	-	700	700	100
VFA	1400	500	-	136	136	117

หมายเหตุ : ทุกค่ามีหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรยกเว้น pH

ตาราง ค.4 ผลกระทบของ pH ต่อเปอร์เซ็นการลดลงของสารอาหาร

PH	Mg^{2+}(%)	NH_4^+(%)	PO_4^{3-}(%)	Ca^{2+}(%)
7.06	44.44	7.84	0.00	2.53
8.05	33.33	47.66	35.48	11.39
9.01	66.67	50.87	33.40	11.39
10.01	77.78	58.26	39.64	11.39
11.01	77.78	19.72	27.16	11.39
12.03	77.78	8.81	38.26	37.97

ตาราง ค.5 ผลกระทบของสารตั้งต้นที่มีผลต่อเปอร์เซ็นการลดลงของสารอาหาร

หาอัตราส่วน Mg^{2+}:PO_4^{3-}	Mg^{2+}(%)	PO_4^{3-} (%)	Ca^{2+}(%)
1:1	70	61.60	9.09
1:2	80	90.26	9.09
2:1	78.26	72.78	0

เอกสารอ้างอิง

รวินศักดิ์ ภูมิธนนิเวศน์ และ ปฐมพงษ์ แสงวิไล. (27 กุมภาพันธ์ 2558), วิกฤตฟอสฟอรัส วิกฤตโลก (Phosphorus Crisis – World Crisis)(ออนไลน์). เข้าถึงจาก : http://www.sc.mahidol.ac.th/usr/?p=461.

Gofertilizerplus. (28 พฤษภาคม 2556), ปุ๋ยฟอสเฟต(ออนไลน์). เข้าถึงจาก : http://www.gofertilizerplus.com.

กลุ่มอุตสาหกรรม 4. (2544), ทำไมปุ๋ยแพง.ในกองนโยบายอุตสาหกรรมรายสาขา 2, สมาคมการค้าปุ๋ยและธุรกิจการเกษตรไทย.

ผู้จัดการออนไลน์. (18 มีนาคม 2557), สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)ผลิตปุ๋ยละลายช้าจากแร่ธาตุในน้ำเสีย. เข้าถึงจาก : http://www.manager.co.th/Science/ViewNews.aspx?NewsID=9570000030661.

พัทธนันท์ นาถพินิจ, ฐิติรัตน์ ดิษฐ์แก้ว, และทวี สัปปินันท์. (2559), การตกตะกอนแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตจากน้ำเสียยางพาราที่ผ่านการผลิตก๊าซชีวภาพแล้ว (Precipitation Magnesium Ammonium Phosphate from Anaerobic Rubber Wastewater). ใน สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ปีที่ 24. ฉบับที่ 6 (ฉบับพิเศษ): 968-978.

ตรองรัก บุญเติม, จุลชาติ จุลเพชร. (2552), คุณภาพน้ำเสียจากฟาร์มสุกรในจังหวัดพังงา ระหว่างปี 2548 -2552. งานวิจัยสำนักงานปศุสัตว์จังหวัดพังงา, จังหวัดพังงา.

ณัฐสิมา โทขันธ์, ชุลีมาศ บุญไทย อิวาย, และมงคล ต๊ะอุ่น. (2554), การบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรโดยใช้แหนแดง. วิทยานิพนธ์ วท.ม. ทรัพยากรที่ดินและสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

นันทิยา เปปะตัง. (2550), ศักยภาพน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม เพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพในประเทศไทย. ศูนย์ความเป็นเลิศเฉพาะทางด้านการจัดการและใช้ประโยชน์จากของเสียอุตสาหกรรมการเกษตร, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี-บางขุนเทียน.

รอบรู้ รังสิเวค. (2558), การผลิตปุ๋ยสตรูไวท์จากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากโรงงานเกษตรอุตสาหกรรมและฟาร์มสุกร. งานวิจัยคณะวิศวกรรมศาตร์ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยบูรพา.

กรมควบคุมมลพิษ. (2558), โครงการศึกษาการเพิ่มมูลค่าน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบการผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกร ตามแนวทางเศรษฐกิจพอเพียง. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.

มุกดา สุขสวัสดิ์. (2547), ปุ๋ยและการใช้ปุ๋ยอย่างมีประสิทธิภาพ. กรุงเทพมหานครฯ: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.

กองบรรณาธิการการเกษตร. (2559), นวัตกรรมใหม่ปุ๋ยไทย.กรุงเทพมหานครฯ: สำนักพิมพ์ปัญญาชน.

JOHNSTON, A.E. and STEEN. (2000), Understanding Phosphorus and its Use in Agriculture [วิทยานิพนธ์สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม]. EFMA - European Fertilizer Manufacturers Association, Brussels 2000

สุธา ขาวเธียร. (2557), การบำบัดน้ำเสีย. ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ 2557(พฤศจิกายน): p 5-1 – 5-69.

กรมอุตสาหกรรม. (2557), ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ. กรุงเทพมหานครฯ: สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม.

ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2556), การใช้ปุ๋ย. กรุงเทพมหานคร:สำนักพิมพ์จุฬาฯ.

Sirianuntapiboon and Chaiyasing. (2000), Removal of Vat Dyes from Textile Wastewater Using Biosludge [วิทยานิพนธ์สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม]. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

อรัญ หันพงศ์กิตติกูลา และคณะ (2554), การศึกษาวิธีการแยกน้ำมันจากน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม[วิทยานิพนธ์สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม]. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

G.D. Najafpour et al.(2005), Treatment of pulp and paper mill wastewater by polyacrylamide (PAM) in polymer induced flocculation[วิทยานิพนธ์สาขาชีวเคมี]. Babol Noshirvani University of Technology.

กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, (2547), ข้อมูลจำนวนเกษตรกรและปศุสัตว์ในประเทศไทยประจำปี 2547[ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก http://ict.dld.go.th/th2/index.php/th/

สุธา ขาวเธียร. (2555), การบำบัดธาตุอาหารของพืชที่ปนเปื้อนในน้ำเสียและการนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ด้วยกระบวนการทางเคมี. ใน สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. การสัมมนาเผยแพร่ผลงานวิจัย. เชียงราย.

YingHao Liu, Jung-Hoon Kwag, Jae-Hwan Kim and ChangSix Ra. (2011), Recovery of nitrogen and phosphorus by struvite crystallization from swine wastewater. Journal of Desalination: 364–369

Raffaele Taddeo, Kari Kolppo and Raghida Lepistö. (2016), Sustainable nutrients recovery and recycling by optimizing the chemical addition sequence for struvite precipitation from raw swine slurries. Journal of Environmental Management: 52–58

Sampriti Kataki, Helen West, Michèle Clarke and D.C. Baruah. (2016), Phosphorus recovery as struvite from farm, municipal and industrial waste: Feedstock suitability, methods and pre-treatments. Journal of Waste Management: 437–454

กรรณิการ์ สิริสิงห์. (2549), เคมีของน้ำ น้ำโสโครก และ การวิเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์. (2551), คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กลุมงานเคมี สวนวิจัยและพัฒนาดานวิทยาศาสตร. (2550), คูมือการปฏิบัติงานการวิเคราะหคุณภาพน้ำ. ใน สำนักวิจัยและพัฒนา. กรมชลประทาน

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, (2559), คูมือวิชาการระบบบำบัดน้ำเสียแบบไมใชอากาศเล่มที่ 1. กรุงเทพมหานครฯ:ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2559), ระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน[ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก http://www.greenwatertreat.com/15414821

กรมควบคุมมลพิษ. (2544), โครงการการจัดทำแนวทางการออกแบบวิศวกรรมเพื่อปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมให้มีประสิทธิภาพและประหยัดพลังงานโดยระบบไม่ใช้ออกซิเจน รายงานความก้าวหน้า ครั้งที่ 1. กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม.

กรมควบคุมมลพิษ. (2545), โครงการการจัดทำแนวทางการออกแบบวิศวกรรมเพื่อปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมให้มีประสิทธิภาพและประหยัดพลังงานโดยระบบไม่ใช้ออกซิเจน รายงานความก้าวหน้า ครั้งที่ 2. กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2540), โครงการศึกษาเพื่อประเมินปริมาณสารมลพิษอุตสาหกรรมทางน้ำจากภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทย รายงานฉบับสมบูรณ์. กระทรวงอุตสาหกรรม.